

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Konstrukce rekuperačního výměníku tepla pro zefektivnění kondenzace  
paro-plynové směsi

Construction of the Recuperative Heat Exchanger to Streamline the  
Condensation of the Steam-Gas Mixture

Student: Bc. Adrian Stec

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2019

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Adrian Stec**

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma:

**Konstrukce rekuperačního výměníku tepla pro zefektivnění kondenzace  
paro-plynové směsi**

**Construction of the Recuperative Heat Exchanger to Streamline the  
Condensation of the Steam-Gas Mixture**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Zpracujte konstrukční návrh výměníku tepla jaderné elektrárny (JE) tlakovodního typu 1200 MWe pro zefektivnění kondenzace paroplynové směsi při havarijních procesech v I. okruhu JE. Proveďte tepelný výpočet a stanovte základní rozměry rekuperačního výměníku včetně pevnostního výpočtu pláště nádrže a analyzujte možné havarijní a provozní stavy. Navrhněte parní kolektor a pojistné zařízení. Řešte průběh teplotního pole v oblasti výměníku tepla programem ANSYS. Proveďte výkres sestavy technologie. Tepelný výkon výměníku tepla je 620 kW a teplota vstupní chladicí vody je 27 °C.

Seznam doporučené odborné literatury:

Hejzlar, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1. a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.

Mátal, O.: *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.

Hezoucký, F.: *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Adrian Stec

Adresa trvalého pobytu autora práce: Ropice 300, 73961 Ropice

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

STEC, A. *Konstrukce rekuperačního výměníku tepla pro zefektivnění kondenzace paroplynové směsi*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2019, 64 s. Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem bezpečnostní, kondenzační nádoby a návrhem konstrukce vnitřního výměníku tepla. Jedná se o bezpečnostní zařízení kompenzace chladiva primárního okruhu JE tlakovodního reaktoru VVER 1200.

V první části práce je popsána funkce a hlavní části kondenzační nádoby, následně se práce zaměřuje na popis rekuperačních výměníku tepla. Zde je popsána funkce, tvarové varianty a intenzifikace přenosu tepla. V praktické části práce je proveden tepelný výpočet a výpočet hlavních rozměrů nádoby a vnitřního výměníku tepla. Následně je proveden návrh parního kolektoru, pojistného zařízení a proveden pevnostní výpočet pláště. V další části práce jsou provedeny výpočetní modely výměníku tepla pro různé tvarové varianty. Výsledný tvar výměníku tepla je zakomponován do 3D modelu sestavy kondenzační nádoby. V posledním kroku byla provedena výkresová dokumentace.

## ANNOTATION OF THESIS

STEC, A. *Construction of the Recuperative Heat Exchanger to Streamline the Condensation of the Steam-Gas Mixture*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2019, 64 p. Thesis head: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

This thesis deals about structural design of internal heat exchanger of condensation tank. This condensation tank is a special safety device of primary circuit, which regulates pressure of cooling water. This device is constructed for pressure water reactor VVER 1200.

First part of thesis deals about principle of function of condensation tank and main parts of this device. Then are describe function and construction of heat exchanger used in condensation device. The practical parts of thesis consist of calculation and design of main parts of condensation tank and internal heat exchanger. Next parts of thesis are consist of mathematical models of different shape of heat exchangers. The best shape of heat exchanger is used in construction of tank. In last part of thesis are realised results of calculation and created 3D model of condensation tank. Then 3D model is transfer to the drawing documentation.

**Obsah**

<b>SEZNAM POUŽITÉHO OZNAČENÍ .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>12</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>1. KONDENZAČNÍ NÁDOBA, ÚLOHA A FUNKCE V PRIMÁRNÍM OKRUHU JE .....</b>	<b>14</b>
1.1. PRINCIP UMÍSTĚNÍ, ZAPOJENÍ A ROZVODU PAROPLYNOVÉ SMĚSI .....	14
1.2. ČINNOSTI KONDENZAČNÍ NÁDOBY PŘI NORMÁLNÍM PROVOZNÍM REŽIMU .....	15
1.2.1. Normální provozní režim systému .....	15
1.2.2. Režim najíždění bloku.....	15
<b>2. ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ PRVKY SMĚŠOVACÍ, KONDENZAČNÍ NÁDOBY .....</b>	<b>16</b>
2.1 TLAKOVÁ NÁDOBA .....	16
2.2 ROZVOD PAROPLYNOVÉ SMĚSI .....	17
2.3 VLOŽENÉ CHLADICÍ ZAŘÍZENÍ.....	18
2.4 PŘÍVOD DUSÍKU .....	19
2.5 DOPROVODNÉ ZAŘÍZENÍ .....	19
<b>3. REKUPERAČNÍ VÝMĚNÍKY TEPLA .....</b>	<b>20</b>
3.1 PRINCIP FUNKCE REKUPERAČNÍCH VÝMĚNÍKU TEPLA .....	20
3.2 ROZDĚLENÍ REKUPERAČNÍCH VÝMĚNÍKU TEPLA .....	21
3.3 POŽADAVKY NA KONSTRUKCI REKUPERAČNÍCH VÝMĚNÍKU TEPLA .....	21
3.4 INTENZIFIKACE SDÍLENÍ TEPLA REKUPERAČNÍCH VÝMĚNÍKU .....	23
<b>4. VÝPOČET .....</b>	<b>24</b>
4.1. ZADANÉ PARAMETRY .....	24
4.2. VÝPOČET ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ VÝMĚNÍKU TEPLA .....	24
4.3. URČENÍ SOUČinitele PŘESTUPU TEPLA K.....	25
4.4. VÝPOČET A NÁVRH ROZMĚRŮ VÝMĚNÍKU .....	28
4.5. NÁVRH HLAVNÍCH ROZMĚRŮ KONDENZAČNÍ NÁDOBY .....	30
4.6. NÁVRH PARNÍHO KOLEKTORU .....	31
4.7. NÁVRH POJISTNÉHO ZAŘÍZENÍ.....	32
4.8. NÁVRH POUŽITÝCH MATERIÁLU .....	33
4.8.1. Plášť kondenzační nádrže a vnitřní vestavby .....	33
4.8.2. Konstrukce uložení tlakové nádoby.....	33
4.8.3. Spojovací součásti.....	34
4.9. PEVNOSTNÍ VÝPOČET PLÁŠTĚ KONDENZAČNÍ NÁDOBY .....	34
4.9.1. Výpočet pláště kondenzační nádrže na vnitřní přetlak.....	37
4.9.2. Výpočet pláště tlakové nádoby na vnější přetlak.....	42
<b>5. VOLBA POUŽITÍ VHODNÉ TVAROVÉ VARIANTY VNITŘNÍHO VÝMĚNÍKU TEPLA ..</b>	<b>46</b>
5.1. ZÁKLADNÍ POŽADAVKY PRO POUŽITÍ VHODNÉHO TYPU VÝMĚNÍKU TEPLA .....	46

5.2.	VÝBĚR TVAROVÝCH VARIANT VÝMĚNÍKU TEPLA PRO NÁSLEDNÉ MODELOVÁNÍ A POUŽITÍ .....	47
5.3.	POSTUP ŘEŠENÍ MATEMATICKÉHO MODELU V PROGRAMU ANSYS FLUENT .....	50
5.3.1	<i>Vyhodnocení výsledku výpočtu a modelu varianty č. 1. ....</i>	<i>51</i>
5.3.2	<i>Vyhodnocení výsledku výpočtu a modelu varianty č. 2. ....</i>	<i>52</i>
5.3.3	<i>Vyhodnocení výsledku výpočtu a modelu varianty č. 3. ....</i>	<i>53</i>
5.4	SROVNÁNÍ A VÝBĚR POUŽITÉ TVAROVÉ VARIANTY VNITŘNÍHO VÝMĚNÍKU TEPLA .....	54
5.5	VÝPIS DAT VÝPOČTŮ JEDNOTLIVÝCH TVAROVÝCH VARIANT VÝMĚNÍKU .....	54
5.5.1	<i>Rekuperační trubkový výměník s teplosměnnými hady seřazenými nad sebou (varianta č.1).</i>	<i>54</i>
5.5.2	<i>Rekuperační trubkový výměník s přesazenými teplosměnnými hady s stejným tvarem (varianta č.2)</i>	<i>58</i>
5.5.3	<i>Rekuperační trubkový výměník s přesazenými teplosměnnými hady s různým tvarem (varianta č.3)</i>	<i>60</i>
<b>6.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>62</b>
<b>7.</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>63</b>
<b>8.</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>64</b>

**SEZNAM POUŽITÉHO OZNAČENÍ**

a	koeficient pevnosti podélné řady otvorů	[-]
b <sub>v</sub>	šířka prstence výztuhy	[m]
c	rozdíl tloušťky plechu dle ČSN EN 10029	[m]
c <sub>p</sub>	měrná tepelná kapacita ochlazované vody	[J×kg <sup>-1</sup> ×K <sup>-1</sup> ]
c <sub>pch</sub>	měrná tepelná kapacita chladicí vody na vstupu	[J×kg <sup>-1</sup> ×K <sup>-1</sup> ]
c <sub>pv</sub>	měrná tepelná kapacita vody	[J×kg <sup>-1</sup> ×K <sup>-1</sup> ]
d	jmenovitá světlost trubky teplosměnného hadu	[m]
D	vnější průměr trubky teplosměnného hadu	[m]
d <sub>1</sub>	vnější průměr servisního vlezu	[m]
d <sub>2</sub>	průměr odvodu paroplynové směsi	[m]
d <sub>3</sub>	průměr přívodu dusíku	[m]
D <sub>B</sub>	vnitřní průměr nádrže	[m]
d <sub>mez</sub>	mezní průměr nevyztuženého otvoru	[m]
d <sub>poj</sub>	průměr otvoru pojistného zařízení	[m]
D <sub>S</sub>	vnější průměr nádrže	[m]
d <sub>try</sub>	jmenovitý průměr trysky parního rozvodu	[m]
E	Modul pružnosti oceli	[Pa]
f	Petukohovo číslo	[-]
f <sub>v</sub>	vyztužená plocha nátrubku	[m <sup>2</sup> ]
g	gravitační zrychlení	[m×s <sup>-2</sup> ]
Gr	Grashofovo číslo	[-]
h	počet teplosměnných hadů chladicího registru	[ks]
h <sub>n</sub>	výška vyztužené části nátrubku	[m]
i <sub>p</sub>	entalpie paroplynové směsi	[J×kg <sup>-1</sup> ]
I <sub>r</sub>	tuhost žebra	[m <sup>4</sup> ]
I <sub>sk</sub>	skutečná tuhost žeber	[m <sup>4</sup> ]
i <sub>v</sub>	entalpie ochlazované vody před odfukem	[J×kg <sup>-1</sup> ]
k	součinitel prostupu tepla stěnou teplosměnného hadu	[W ×m <sup>-2</sup> ×K <sup>-1</sup> ]
k ×S	měrný výkon výměníku tepla	[W×K <sup>-1</sup> ]
l	délka teplosměnného hadu	[m]
l <sub>0</sub>	rozteč mezi nátrubky	[m]
l <sub>1</sub>	délka přívodního potrubí chladicí vody	[m]
l <sub>2</sub>	délka odváděcího potrubí chladicí vody	[m]



$l_B$	celková délka kondenzační nádoby	[m]
$l_{B1}$	délka válcové části kondenzační nádoby	[m]
$L_{Kr}$	kritická délka válcové části pláště tlakové nádoby	[m]
$l_{žeb}$	rozteč mezi vnitřními žebry	[m]
$m$	počet vnitřních kruhových žebor	[ks]
$m_{ch}$	množství chladicí vody	$[kg \times s^{-1}]$
$m_{max}$	maximální množství protékající páry	$[kg \times m^{-2} \times s^{-1}]$
$m_{max,poj}$	maximální množství protékající páry pojistným zařízením	$[kg \times m^{-2} \times s^{-1}]$
$m_p$	množství paroplynové směsi na vstupu	$[kg \times s^{-1}]$
$m_{v2}$	množství ochlazované vody v nádrži po odfuku	[kg]
$m_{v1}$	množství ochlazované vody v nádrži před odfukem	[kg]
$n$	počet trysek parního kolektoru	[ks]
$n_{Re0,2}$	součinitel bezpečnosti pro mez kluzu	[-]
$n_{Rm}$	součinitel bezpečnosti pro mez pevnosti	[-]
$Nu$	Nusseltovo číslo	[-]
$o$	počet ohybu teplosměnného hadu	[-]
$p_0$	tlak paroplynové směsi na vstupu do kondenzační nádoby	[Pa]
$p_{Kr}$	kritický přetlak	[Pa]
$p_{Krv}$	kritický přetlak nádoby s žebry	[Pa]
$p_{max}$	dovolený maximální přetlak pláště	[Pa]
$p_{poj}$	maximální tlak v tlakové nádobě	$[kp \times cm^{-2}]$
$Pr$	Prandtlovo číslo	[-]
$Pr_w$	Prandtlovo číslo na stěně teplosměnného hadu	[-]
$p_z$	nejmenší dovolený zkušební přetlak	[Pa]
$q$	hustota tepelného toku	$[W \times m^{-2}]$
$Q_p$	teplo paroplynové směsi	[J]
$Q_T$	tepelný výkon kondenzační nádoby pro $\tau = 0$ [h]	[J]
$Q_v$	teplo ochlazované vody při 40 °C	[J]
$Q_{v2}$	teplo ochlazované vody po odfuku	[J]
$Q_{v1}$	teplo ochlazované vody v nádrži před odfukem	[J]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[-]
$Ry$	Rayleighovo číslo	[-]
$S$	teplosměnná plocha výměníku tepla	$[m^2]$

s	tloušťka stěny trubky teplosměnného hadu	[m]
S <sub>1</sub>	plocha průřezu přívodní trubky chladicí vody	[m <sup>2</sup> ]
S <sub>2</sub>	plocha průřezu trubky teplosměnného hadu	[m <sup>2</sup> ]
S <sub>3</sub>	plocha průřezu odváděcí trubky výměníku tepla	[m <sup>2</sup> ]
S <sub>B</sub>	plocha kolmého řezu	[m <sup>2</sup> ]
S <sub>K</sub>	plocha otvoru trysky	[m <sup>2</sup> ]
s <sub>n</sub>	tloušťka stěny pláště	[m]
s <sub>on</sub>	minimální tloušťka stěny nátrubku	[m]
S <sub>poj</sub>	plocha otvoru pojistného zařízení	[m <sup>2</sup> ]
t <sub>2stř</sub>	střední teplota ochlazované vody	[°C]
t <sub>ba,prac</sub>	pracovní teplota oceli při barometrickém tlaku	[°C]
t <sub>ch,stř</sub>	střední teplota chladicí vody	[°C]
t <sub>ch1</sub>	vstupní teplota chladicí vody	[°C]
t <sub>ch2</sub>	výstupní teplota chladicí vody	[°C]
t <sub>p</sub>	teplota paroplynové směsi na vstupu	[°C]
t <sub>s</sub>	odhadována teplota stěny teplosměnného hadu	[°C]
t <sub>s1</sub>	teplota stěny teplosměnného hadu na straně ochlazované vody	[°C]
t <sub>s2</sub>	teplota stěny teplosměnného hadu na straně chladicí vody	[°C]
t <sub>stř</sub>	střední teplota ochlazované vody před odfukem	[°C]
t <sub>v,stř</sub>	střední teplota ochlazované vody	[°C]
t <sub>v1</sub>	teplota ochlazované vody po odfuku	[°C]
u	výstupní rychlost paroplynové směsi z trysky	[m×s <sup>-1</sup> ]
u <sub>poj</sub>	výstupní rychlost paroplynové směsi do prostoru kontejnmentu	[m×s <sup>-1</sup> ]
v <sub>0</sub>	měrný objem vstupní páry	[m <sup>3</sup> ×kg <sup>-1</sup> ]
V <sub>B</sub>	objem kondenzační nádoby	[m <sup>3</sup> ]
V <sub>B,skut</sub>	skutečný objem kondenzační nádoby	[m <sup>3</sup> ]
v <sub>poj</sub>	měrný objem páry	[m <sup>3</sup> ×kg <sup>-1</sup> ]
w	rychlost proudění chladicí vody	[m×s <sup>-1</sup> ]
w <sub>1</sub>	rychlost proudění chladicí vody v přívodní trubce	[m×s <sup>-1</sup> ]
w <sub>2</sub>	rychlost proudění chladicí vody v trubce teplosměnného hadu	[m×s <sup>-1</sup> ]
w <sub>3</sub>	rychlost proudění chladicí vody v odváděcí trubce výměníku tepla	[m×s <sup>-1</sup> ]
α <sub>1</sub>	součinitel přestupu tepla na straně chladicí vody	[W × m <sup>-2</sup> × K <sup>-1</sup> ]
α <sub>2</sub>	součinitel přestupu tepla na straně ochlazované vody	[W × m <sup>-2</sup> × K <sup>-1</sup> ]

$\lambda_{oc}$	součinitel tepelné vodivosti oceli	$[W \times m^{-2} \times K^{-1}]$
$\lambda_v$	součinitel tepelné vodivosti ochlazované vody	$[W \times m^{-2} \times K^{-1}]$
$\nu_{ch1}$	kinematická viskozita chladicí vody v přívodní trubce	$[m^2 \times s^{-1}]$
$\nu_{ch2}$	kinematická viskozita chladicí vody v teplosměnném hadu	$[m^2 \times s^{-1}]$
$\Delta Q$	přírůstek tepla vlivem odfuku	$[J]$
$\Delta t$	rozdíl teplot ochlazované a chladicí vody	$[^{\circ}C]$
$\rho_{ch}$	hustota chladicí vody v přívodní trubce	$[kg \times m^{-3}]$
$\rho_{ch2}$	hustota chladicí vody v teplosměnných hadech	$[kg \times m^{-3}]$
$\sigma_{Kr}$	kritické napětí pláště	$[Pa]$
$\sigma_{Krv}$	kritický namáhání při přetlak nádoby s žebry	$[Pa]$
$\sigma_N$	skutečné dovolené napětí	$[Pa]$
$\sigma_{N,zk}$	dovolené napětí při hydraulické zkoušce	$[Pa]$
$\sigma_{Re0,2}$	dovolené napětí pro mez kluzu	$[Pa]$
$\sigma_{Rm}$	dovolené napětí pro mez pevnosti	$[Pa]$
$\tau$	doba trvání odfuku paroplynové směsi	$[s]$
$\tau_{ch}$	doba, po kterou probíhá ochlazování	$[s]$
$\nu$	kinematická viskozita chladicí vody	$[m^2 \times s^{-1}]$
$\nu_v$	kinematická viskozita ochlazované vody	$[m^2 \times s^{-1}]$
$\varphi$	koeficient pevnosti pláště	$[-]$
$\varphi_0$	součinitel oslabení pláště	$[-]$

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

JE	jaderná elektrárna
VVER	vodo-vodní energetický reaktor
3D	třírozměrné
ČR	Česká republika
KO	kompensátor objemu

## ÚVOD

Jaderné elektrárny jsou komplexní energetické celky, které mají nepostradatelnou pozici v české energetické soustavě. Na tyto komplexy jsou kladeny vysoké nároky a standardy v oblasti bezpečnosti, spolehlivosti, pravidelnosti dodávky elektrické energie a v mnoha ostatních aspektech.

Aby byla dodržena tyto kritéria jsou jaderné elektrárny vybaveny technologickými zařízeními na vysoké úrovni, které jsou neustále monitorovány revidovány z důvodu správnosti své funkce. Modernizace těchto zařízení je podstatnou částí koloběhu údržby a provozu jaderné elektrárny. Cílem těchto modernizací je dosažení zlepšení provozních parametrů, navýšení spolehlivosti, dosažení ekonomičtějšího provozu zařízení.

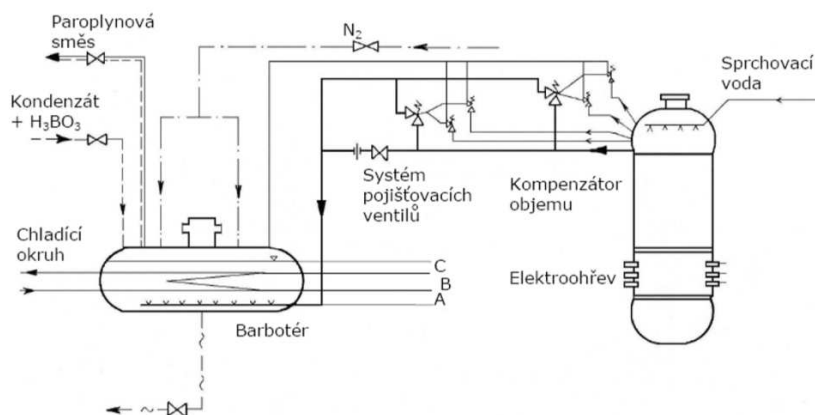
Tato práce se zabývá touto problematikou, kdy řeší konstrukční návrhy výměníku tepla bezpečnostního zařízení kompenzace objemu primárního okruhu JE. Hlavním cílem této práce je zefektivnit odvod tepla z chladicí náplně kondenzační nádoby, pomocí vloženého chladicího výměníku tepla a tím dosažení efektivnější kondenzace paroplynové směsi. Další cíle této práce je provedení návrhu a konstrukce kondenzační nádoby, parního kolektoru a pojistných zařízení.

## 1. Kondenzační nádoba, úloha a funkce v primárním okruhu JE

### 1.1. Princip umístění, zapojení a rozvodu paroplynové směsi

Kondenzační nádoba je bezpečnostně, regulační zařízení primárně sloužící k zajištění poklesu tlaku v primárním okruhu JE. Toto zařízení je nezbytnou součástí primárního okruhu tlakovodní jaderné elektrárny, kdy je součástí zařízení pro kompenzaci objemu chladicí vody primárního okruhu. Jedná se o horizontální, tlakovou nádobu obsahující vodní náplň, sloužící ke kondenzaci paroplynové směsi. [3.], [5.], [8.], [12.]

Toto zařízení je propojeno příváděcím potrubím paroplynové směsi s kompenzátorem objemu a ten je následně umístěn na jedné ze smyček primárního okruhu, na teplé větvi vyúsťující z tlakové nádoby reaktoru. Regulace propouštění paroplynové směsi z kompenzátoru objemu je zajištěna pomocí pojistných a odlehčovacích ventilů. Tyto ventily jsou konstruovány tak, že při nežádoucím navýšení tlaku v primárním okruhu a nedostatečné regulační schopnosti kompenzátoru objemu dojde k navýšení tlaku nad dané parametry, následně jsou tyto ventily otevřeny a směs je propuštěna do kondenzační nádoby. Pomocí přívodního potrubí napojené na parní kolektor je médium rozvedeno v nádobě. V obsahu vodní náplně tato paroplynová směs probublává a předává své latentní teplo vodní náplni. Tento princip kondenzace páry je založen na principu směšovacího výměníku tepla. Odvod tepla přivedené při odvodu páry do nádrže je zajištěn pomocí vloženého chladicího zařízení. Jedná se o rekuperační trubkový výměník tepla, který je umístěn pod hladinou vodní náplně. Toto teplo je následně odváděno za pomoci vnějšího okruhu chladicí vody pryč z nádrže a je následně mařeno. Plynné látky, které jsou spolu spárou přivedeny do nádrže jako vodík, dusík a inertní plyny se shromažďují v horní části nádrže nad hladinou vodní náplně. Tyto plyny je nutné odvádět, za účelem udržení nominálního tlaku v nádrži a zajištění nevýbušné koncentrace plynu. [5.], [7.], [8.], [12.]



Obr. 1.1 Schéma systému kompenzace objemu chladiva [8.]

## **1.2. Činnosti kondenzační nádoby při normálním provozním režimu**

Normální provozní režim, jedná se o stav systému, kdy jsou dodrženy všechny parametry na nominálních hodnotách a nejsou překročeny limity a podmínky určující normální provozní stav. [8.], [12.]

### **1.2.1. Normální provozní režim systému**

Při normálním provozu primárního okruhu JE, je v nádobě udržován provozní tlak. Tato regulace tlaku je zajištěna pomocí automatického přívodu dusíku, sekundární funkcí přiváděného dusíku je regulace výbušné koncentrace plynu v nádrži. Jedná se především o vodík, který vzniká při termickém rozkladu vody. [8.], [12.]

Dalším médiem vstupujícím do prostoru nádrže je malé množství paroplynové směsi, které je zapříčiněno průnikem netěsnostmi pojistných ventilů. Tato pára v prostoru nádoby kondenzuje a navyšuje obsah vodní náplně nádrže, proto je nutné tento kondenzát odvádět a udržovat hladinu ve jmenovité výšce. Nezbytné je také odvádět teplo, které bylo předáno při kondenzaci páry. To je zajištěno pomocí regulace průtoku vody v chladicím zařízení a je udržováno na požadované hodnotě. [8.], [12.], [13.]

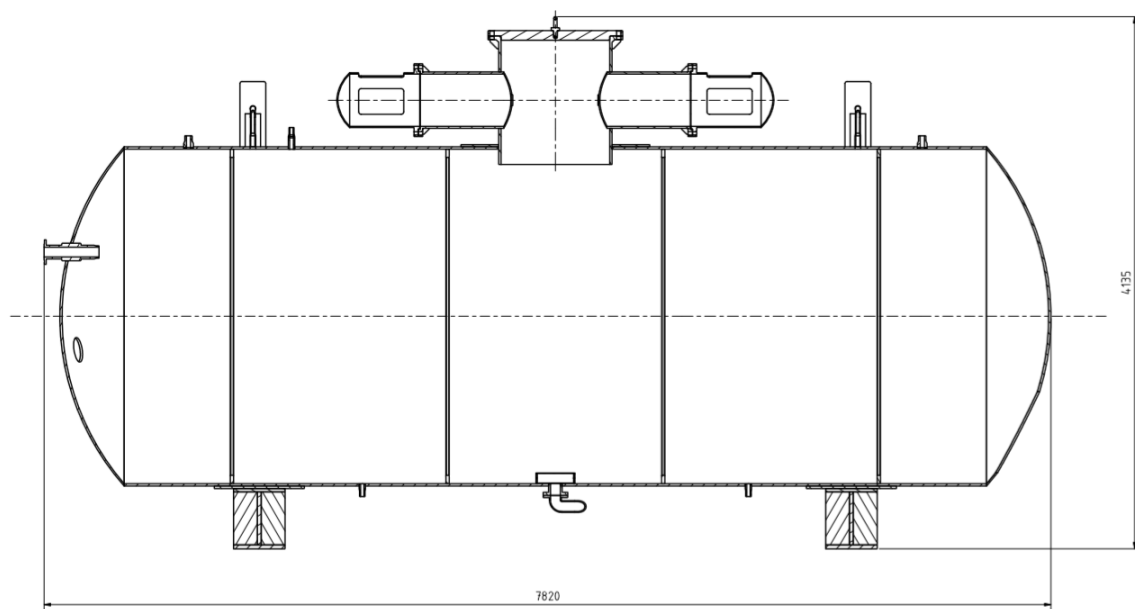
### **1.2.2. Režim najíždění bloku**

Při spouštění bloku JE se primárně kondenzační, směšovací nádrž zaplní kondenzátem na provozní hladinu. Další úlohou souboru kompenzace objemu je dosažení požadovaného tlaku v primárním okruhu JE. Tento tlak je potřebný pro najetí primárních cirkulačních čerpadel. Tento tlak je vyvozen za pomoci přívodu dusíku do kompenzátoru objemu, po dosažení požadované hodnoty tlaku je dusík přepouštěn do kondenzační nádrže. Po ukončení přepouštění dusíku jsou parametry tlaku a výšky hladiny v nádrži automaticky udržovány. [8.], [12.]

## 2. Základní konstrukční prvky směšovací, kondenzační nádoby

### 2.1 Tlaková nádoba

Zařízení sloužící k uskladnění zásoby demineralizované chladicí vody pro proces barbotáže paroplynové směsi přivedené z kompenzátoru objemu a doprovodných procesních plynů. Jedna se o vodorovnou, válcovou, tlakovou nádobu, v níž jsou uloženy zařízení pro zajištění kondenzace a zadržení přivedených plynů. Tělo tlakové nádoby je vyrobeno z nerezových ocelí np.: X6CrNiTi18-10, a zajišťuje hermetické oddělení plynu a kondenzátu od okolního prostředí v kontejnmentu JE. Tlaková nádoba je vybavena servisním vlezem pro provádění možných vnitřních oprav zařízení. Další součástí tlakové nádoby jsou otvory pro umístění přívodu paroplynové směsi, chladicí vody vnitřního chladicího zařízení a dalších podpůrných zařízení zajišťující správnou činnost celku. Tlaková nádoba při své konstrukci musí odolávat pracovnímu přetlaku, který může nabýt hodnot **0,89** [MPa], po překročení stanoveného maximálního tlaku dojde porušení pojistných membrán. Vnitřní obsah tlakové nádoby je odveden do prostoru kontejnmentu. Při havarijním stavu může dojít v prostoru kontejnmentu nárůstu tlaku až na hodnotu **0,5** [MPa]. Proto je třeba zajistit stabilitu tlakové nádoby i na vnější přetlak, to se nejčastěji děje za pomoci použití vnitřních kruhových vyztuží nádrže. [5.], [8.]

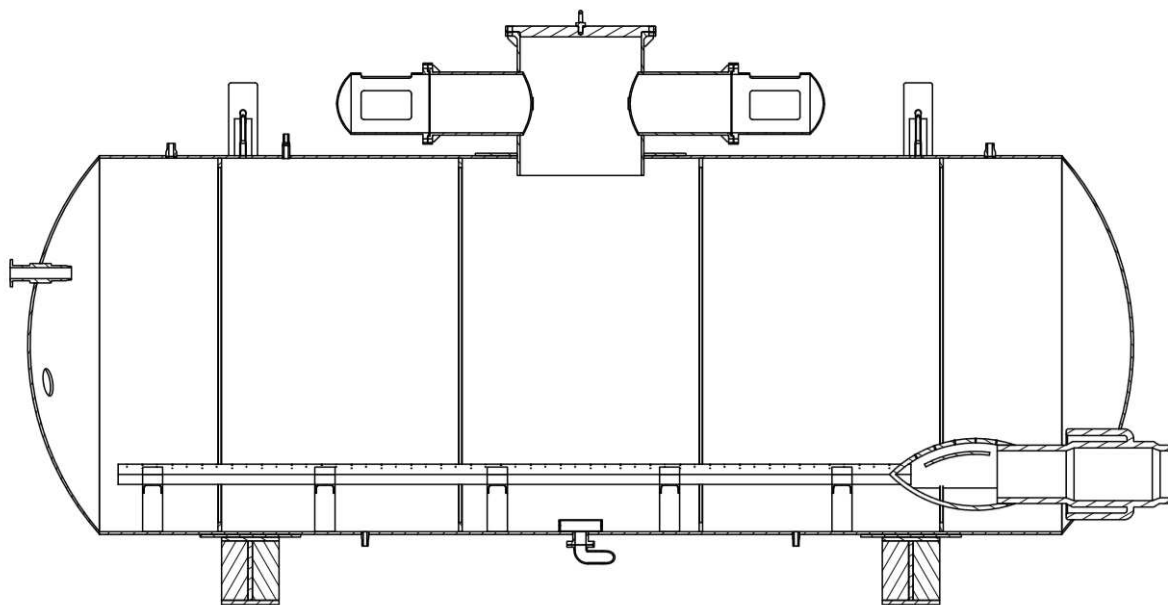


Obr. 2.1. Tlaková nádoba kondenzační, směšovací nádrže pro reaktor VVER 1200 [autor]



## 2.2 Rozvod paroplynové směsi

Paroplynovou směs přivedenou z prostoru kompenzátoru objemu je zapotřebí rozvést po prostoru nádrže, aby byla zaručená správná barbotáž. Správný rozvod media je zajištěn pomocí zařízení rozvodu paroplynové směsi. Přivedena směs plynu a páry je zavedena do přívodního kolektoru, který je spojen s přívodním potrubím zařízení kompenzace objemu. Pomocí přívodního kolektoru je paroplynová směs zavedena do rozváděcí komory. Rozváděcí komora rozváděcího systému slouží k usměrnění a rozvedení paroplynové směsi tak, aby došlo k rovnoměrnému rozdělení proudu plynu do rozváděcích potrubí kondenzační nádrže. Rozváděcí komora je vybavena sérií rozváděcích plechu tak, aby docházelo k usměrnění toku páry k rozváděcím potrubím a nedocházelo ke škodlivému víření. V rozváděcím potrubí dojde k rovnoměrnému rozdělení plynu a páry do prostoru nádoby, to je zajištěné pomocí trysek umístěných na rozváděcím potrubí. Trysky se umísťují na povrchu do řad po celé délce potrubí tak, aby bylo docíleno rovnoměrného rozložení proudů paroplynové směsi do prostoru vodní náplně a tím bylo docíleno co nejrovnoměrnějšího rozložení teplotního pole v objemu chladicí vody. Trysky jsou konstruovány tak, aby došlo k tvorbě malých parních bublin vstupujících do prostoru chladicí vody a tím se dosáhlo co největšího teplosměnného povrchu. Je zapotřebí dodržení žádoucí výstupní rychlost paroplynové směsi, která se pohybuje v rozmezí  $u = (0,4 \text{ až } 0,7) \text{ [m/s]}$ . [5.], [8.]

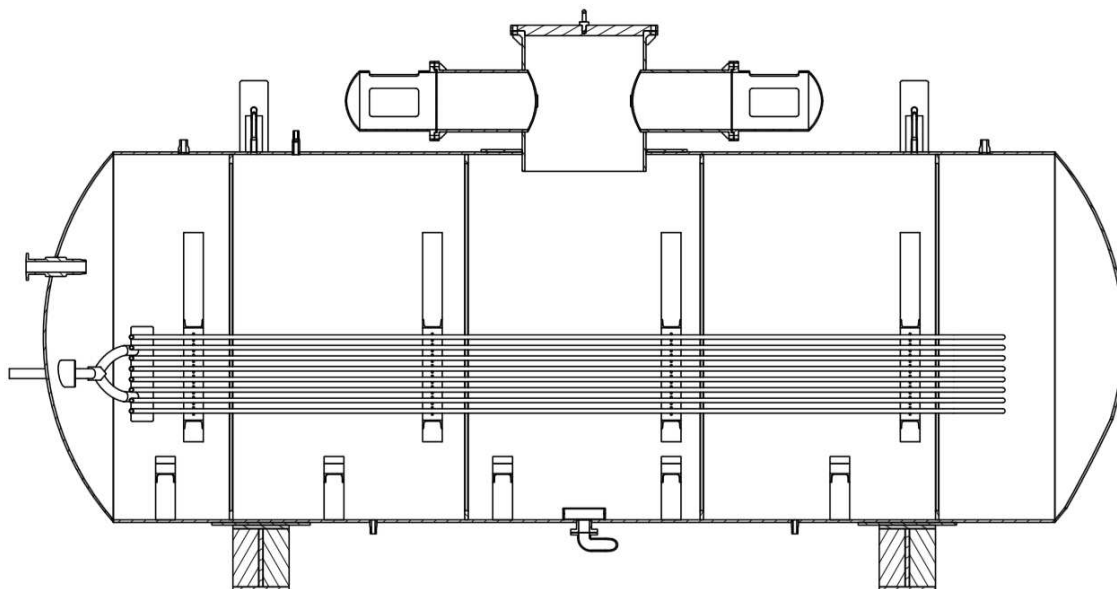


Obr. 2.2. Tlaková nádoba s přívodním kolektorem páro-plynové směsi

Rektoru VVER 1200 [autor]

### 2.3 Vložené chladicí zařízení

Při proběhlé kondenzaci paroplynové směsi přivedené do kondenzační nádoby, došlo ke odevzdání značného množství tepla demineralizované chladicí vodě. Toto teplo je zapotřebí odvádět z prostoru nádrže, aby bylo zamezeno nežádoucímu nárůstu teploty chladicí vody mimo pásmo nominálních hodnot. Při nárůstu teploty nad dovolenou hodnotu může docházet k samovolnému odparu chladicí vody, následně se tyto páry a plyny zdržují v prostoru nad hladinou. Při zvětšeném odparu dochází k zvyšování celkového tlaku v nádrži a následné možnosti porušení tlakového pláště nádrže. Pro to je toto bezpečnostní zařízení vybaveno vnitřním chladicím výměníkem tepla, jedná se o rekuperační trubkový výměník tepla s nucenou cirkulací chladicí vody. Výměník tepla se skládá z teplosměnných, korozivzdorných trubek průměru okolo 32 mm, které jsou uloženy vodorovně v několika řadách nad sebou. Tyto teplosměnné trubky jsou na obou koncích spojeny do rozvaděčů chladicí vody, které jsou napojeny na přívodní a odváděcí potrubí chladicí vody. Regulace pro dosažení nominálních hodnot v kondenzační nádobě se zajišťuje pomocí změny objemového průtoku chladicí vody ve vnitřním výměníku tepla. Tím se změní teplotní spád a součinitele přestupu tepla na vnitřní straně trubky a dojde k změně odvedeného množství tepla. [5.], [8.]



Obr. 2.3. Tlaková nádoba s vnitřním chladicím zařízením, rektoru VVER 1200 [autor]

## 2.4 Přívod dusíku

Zařízení zajišťující udržování koncentrace vícesložkových plynů na požadovaných hodnotách v prostoru nad hladinou demineralizované vodní náplně kondenzační nádoby. Tento prostor je zcela vyplněn vícesložkovou pároplynnou směsí vodní páry, dusíku, vodíku, kyslíku, částečně vzduchu a inertních plynů. Zařízení přívodu dusíku se skládá z nátrubků umístěných na horní části tlakové nádoby. Přívodními nátrubky dusíku je dopravován dusík do prostoru nad hladinou vodní náplně, kde udržuje tlak v nádrži a ředí plyny. Jedná se především o vodík a inertní plyny vzniklé při procesu kondenzace a při radiolýze vody. Je nezbytné nutné udržovat koncentrace výbušných plynů (především vodíku) v pásmech, kdy tyto plyny nejsou výbušné. Pro stále dodržení těchto hodnot je kondenzační nádrž také vybavena odvodem paroplynové směsi z nádrže. Přívod dusíku do prostoru nádrže hraje také nedílnou roli při najíždění a odstavování bloku, kdy se tzv. dusíkový polštář potřebný pro najetí primárních cirkulačních čerpadel přepouští z kompenzátoru objemu do kondenzační nádrže a naopak. [8.]

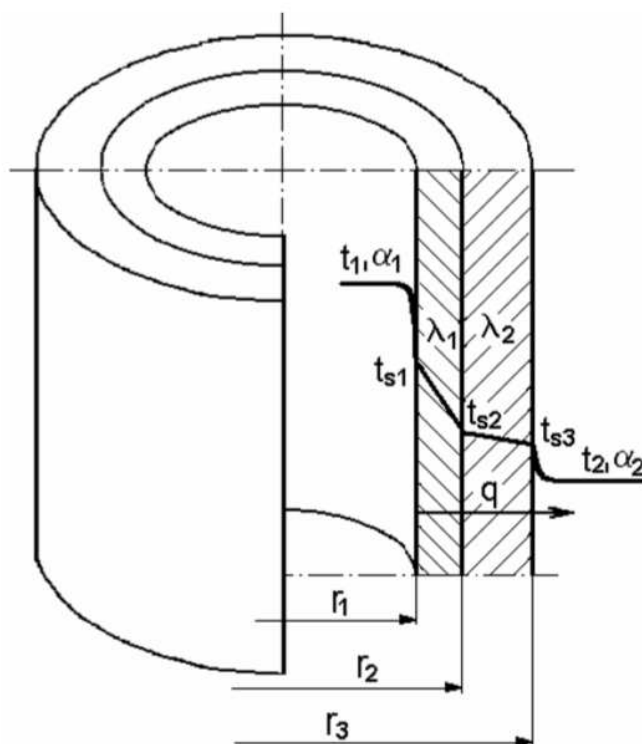
## 2.5 Doprovodné zařízení

- Pojistná membrána – zařízení zajišťující ochranu nádrže před porušením takové nádoby. Při nežádoucím navýšení tlaku (například vlivem nefunkčnosti chladicího výměníku tepla) nad konstrukční parametry dojde k porušení pojistných membrán. Následně je plynný obsah směsi plynů a vodní páry odveden do prostoru kontejnmentu bloku JE.
- Přívod demineralizované chladicí vody – zařízení sloužící k udržení hladiny vodní náplně na požadované hodnotě. Při odstávce zařízení slouží k jeho opětovnému zaplnění demineralizovanou vodou.
- Odvod demineralizované chladicí vody – zařízení zajišťující nominální hodnotu množství chladicí vody v prostoru kondenzační nádrže. Při běžném provozu dochází k přívodu malého množství paroplynové směsi z kompenzátoru objemu vlivem netěsnosti pojistných ventilů. Toto množství zkondenzované paroplynové směsi je zapotřebí odvádět z prostoru nádrže. Tento stejný proces se opakuje při přívodu paroplynové směsi při překročení tlaku v primárním okruhu, veškerý kondenzát po kondenzaci paroplynové směsi je zapotřebí odvést, aby byla dodržena požadovaná hladina chladicí vody. Při odstávce zařízení je zajištěno vyprázdnění obsahu nádrže. Nedílnou součástí provozu tohoto zařízení je zajištění odkalu nádrže od sedimentu a nečistot.
- Odvod paroplynové směsi – zajišťuje odvod více složkových plynů z prostoru kondenzační nádrže k dalšímu zpracování (například ke spalovacím hořákům vodíku), aby byla zajištěna požadovaná koncentrace těchto plynů v prostoru nad hladinou. [5.], [8.]

### 3. Rekuperační výměníky tepla

#### 3.1 Princip funkce rekuperačních výměníků tepla

Zařízení sloužící k průběžnému nebo přerušovanému předávání tepla z jedné teplotnosné látky na jinou, přičemž jsou tyto media od sebe odděleny nepropustnou stěnou. Tato dělicí stěna tvoří výhřevnou plochu výměníku. V tomto zařízení dochází k předávání tepelné energie z teplotnosného media o vyšší teplotě (ohřívacího) do media chladnějšího (ohřívaného). Obě teplotnosná media jsou od sebe oddělená, tím nedochází k přímému kontaktu obou látek, přenosu hmoty a k změně chemických vlastností. K přenosu tepla mezi ohřívací a ohřívanou látkou dochází za pomoci prostupu tepla stěnou. Prostup tepla stěnou v trubkovém rekuperačním výměníku se skládá z přestupu tepla na vnitřní straně stěny trubky, vedením v stěně trubky a přestupu tepla na vnější straně stěny trubky. [2.], [6.], [9.]



$r_1$  – vnitřní průměr [m],  $r_2$  – střední průměr [m],  $r_3$  – vnější průměr [m],  $t_1$  – vnitřní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t_{s1}$  – vnitřní teplota stěny [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $t_{s2}$  – střední teplota stěny [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $t_2$  – vnější teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$t_{s3}$  – vnější teplota stěny [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $\alpha_1$  – vnitřní součinitel přestupu tepla,  $q$  – tepelný tok [W/m],

$\alpha_2$  – vnější součinitel přestupu tepla,  $\lambda_1$  – vnitřní součinitel tepelné vodivosti,

$\lambda_2$  – vnější součinitel tepelné vodivosti

Obr. 3.1. Schéma prostupu tepla válcovou stěnou [4.]

### 3.2 Rozdělení rekuperačních výměníků tepla

Rekuperační výměníky tepla se člení do mnoha skupin podle svého provedení, tvarů různých parametrů:

#### I. Podle účelu a použití:

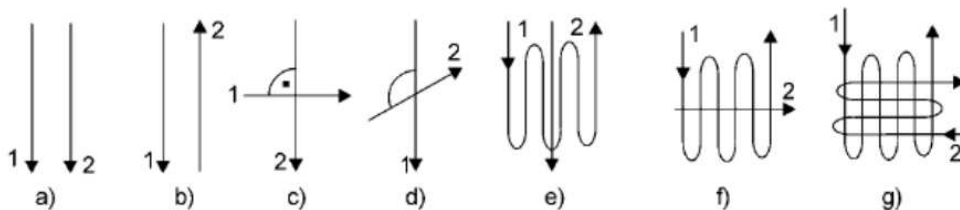
- **ohříváky** - ohřívání média navyšuje svou teplotu, bez změny své fáze
- **chladiče** - ochlazování média snižuje svou teplotu, bez změny fáze
- **výparníky** - ohřívání kapalného média mění svou fázi na plynnou
- **kondenzátory** - medium o větší teplotě v parní fázi kondenzuje na kapalinu
- **přihříváky** - navyšují teplotu syté nebo přehřáté páry

#### II. Podle vzájemného směru proudění:

- **souproudé** - směry obou proudů teplosměnných látek jsou rovnoběžné
- **protiproudé** - směry proudů medií jsou rovnoběžné, ale mají opačný smysl
- **křížové** - osy proudů medií jsou na sebe vzájemně kolmé
- **s šikmým proudem** - osy proudů medií svírají jiný úhel než  $90^\circ$
- **s kombinovaným prouděním**

#### III. Další rozdělení:

- **podle konstrukce** - bubnové, deskové, trubkové, svazkové, šroubové, hadové, ...
- **podle teplosměnných látek** - voda-voda, spaliny-pára, pára-voda, pára-vzduch, ...
- **podle způsobu přenosu** - konvekční, sálavé, kombinované
- **podle skupenství medií** - bez změny skupenství, se změnou fáze jednoho média, ...
- **podle uspořádání trubek** - trubky za sebou, trubky přesazené



a) souproudé, b) protiproudé, c) křížové, d) s šikmým proudem e) až g) kombinované

Obr. 3.2. Schéma typu proudění ve výměnících [6.]

### 3.3 Požadavky na konstrukci rekuperačních výměníků tepla

Při konstrukci výměníku tepla je primárním požadavkem dosažení co nejintenzivnějšího přesunu tepla při zachování co nejnižších investičních nákladů. Dosažení intenzivního přestupu tepla lze docílit použitím vhodného konstrukčního materiálu výměníku tepla, konstrukčními úpravami a volbou použití vhodných teplosměnných látek. [2.], [9.]

### 3.3.1 Požadavky na výměník

Pro správnou funkci výměníku je zapotřebí dodržet základní požadavky, které by měl výměník splňovat:

- **Dodržení co nejmenších rozměru a hmotnosti** - je žádoucí volit konstrukci a rozměry výměníku tak, aby byly splněny jeho požadované parametry při zachování co nejmenších rozměru a hmotnosti. Tím se především zlepši manipulační schopnosti výměníku, cena za užití menšího množství materiálu (souvisí s použitým druhem materiálu, je třeba najít kompromis) a taky tepelná kapacita výměníku na, které závisí reakční doba zařízení.

- **Dodržení co nejmenších tlakových ztrát** – pro udržení provozních nákladů na co nejmenší hodnotě při zachování správné funkce, se v značné míře projevuje tlaková ztráta výměníku. Čím větší jsou tlakové ztráty tím větší je čerpací práce a tím větší náklady na provoz. Vnitřní tlakové ztráty nám závisí na:

- **ztráty třením** - druhu použitých stěn výměníku (drsnot povrchu, průměru potrubí, obvodu průtočného potrubí) a na rychlosti proudění media
- **místní ztráty** – závisí na počtu a tvarové geometrii odporové části potrubí

- **Dodržení co nejvyšší spolehlivosti** - závisí na správném konstrukčním řešení výměníku, a na použití vhodných materiálu. Pro správný spolehlivý provoz musí být výměník konstruován tak, aby byla možná zajištěna snadná údržba a opravitelnost.

### 3.3.2 Požadavky na teplotnosné látky

Při volbě vhodné konstrukce výměníku tepla je třeba brát v úvahu účel a použití zařízení a k tomu zvolit adekvátní teplotnosné látky a naopak. Na vlastnosti teplotnosných látek jsou kladeny značné nároky, aby byla zajištěna řádná a spolehlivá funkce zařízení, při různých provozních stavech. Základní požadavky na teplosměnné látky jsou:

- vysoký součinitel tepelné vodivosti
- velká měrná tepelná kapacita
- nízká viskozita (nižší tlakové ztráty)
- vhodný vztah teploty varu a tlaku
- nízká cena
- nízká agresivita vedoucí k znehodnocení zařízení

Snaha při volbě správné teplotnosné látky je docílit, aby medium co nejvíce splňovalo dané požadavky. Pro běžné použití se nejvíce blíží k těmto požadavkům použití demineralizované vody a vodní páry. Pro přenosy tepla při vysokých teplotách (okolo 900°C) se používají tekuté kovy (např.: směs sodíku a draslíku). [2.], [9.]

### 3.4 Intenzifikace sdílení tepla rekuperačních výměníků

V dnešní době je problematika intenzifikace procesu sdílení tepla velice aktuální a klade se na ní značný důraz. Je žádoucí vytvoření co nejefektivnějšího výměníku tepla, který bude co nejpodrobněji splňovat konstrukční požadavky na tvorbu výměníku a přitom také dodržovat požadavky na jednoduchou konstrukci, spolehlivost a nízkou cenu. Základní způsoby intenzifikace přenosu tepla polehají na těchto principech:

- **Zvětšení teplosměnného povrchu výměníku** – dosažení větší teplosměnné plochy výměníku je možno zajistit mnohými konstrukčními úpravami výměníku. Lze použít jiné rozměry a tvary teplosměnných ploch, tím se ale při vzrůstající teplosměnné ploše výměníku tepla rapidně mění i celková hmotnostní poměry a tím i cena výměníku. Vhodné použití konstrukční úpravy teplosměnné plochy výměníku lze zajistit pomocí použití žebrování teplosměnných ploch. Žebra nejsou pevnostně namáhána a tím jsou z hlediska hmotnosti vhodné pro použití jako přídavný teplosměnný element. Konstrukce návrhu použití žebrování podléhá těmto zásadám:
  - Použití žeber na straně, kde je malý součinitel přestupu tepla
  - Pokud je součinitel přestupu tepla na obou stranách teplosměnného elementu obdobný, musí být použito žebrování na obou stranách teplosměnného elementu
- **Zdokonalení konstrukčního provedení výměníku tepla** – pro tento postup zefektivnění výměníku tepla je zásadní eliminace mrtvých koutů výměníku, kde dochází k nejmenšímu přestupu tepla. Toto lze docílit změnou tvaru teplosměnných ploch, změnou tvaru a konstrukce kanálu, regulací proudů teplosměnných medií. Nedílnou součástí je také zajištění utěsnění výměníku a dokonalé odvětrání zařízení.
- **Zvětšením turbulence proudu** – použití v případech, kde je Reynoldsovo číslo příliš nízké a dochází zde ke laminárnímu proudění. Laminární proudění se nejčastěji vyskytuje tam, kde je teplosměnným médiem plyn nebo pomalu proudící kapalina. Navýšení Reynoldsova čísla tak, aby bylo zajištěné čistě turbulentní proudění se provádí za pomoci pulzátorů, twisted tube, mixerů. Lze taky použít destruktory laminárních vrstev, jedná se o tvarové pásy, dráty vložené do trubek nebo umístěny na teplosměnných plochách.
- **Zmenšení určujících geometrických rozměrů teplosměnných částí** – jedná se o změnu hlavních rozměrů teplosměnných elementů tím se docílí mírné zvětšení součinitele přestupu tepla. Tento způsob zefektivnění výměníku je nejednoznačný. [2.]

## 4. Výpočet

### 4.1. Zadané parametry

- Tepelný výkon  $Q_T = 620 \text{ kW}$
- Teplota vstupní chladicí vody  $t_{ch1} = 27 \text{ °C}$

### 4.2. Výpočet základních parametrů výměníku tepla

Teplota chladicí vody na výstupu z výměníku tepla

- $c_{pch} = 4181 \text{ J/kg} \times \text{K}$
- $m_{ch} = 8 \text{ kg/s} = 28800 \text{ kg/h}$

$$t_{ch2} = \frac{Q_T}{m_{ch} \times c_{pch}} + t_{ch1}$$

$$t_{ch2} = \frac{620000}{8 \times 4181} + 27 \quad (\text{eq. 1})$$

$$t_{ch2} = 45,5 \text{ °C}$$

Měrný výkon výměníku tepla

Maximální dovolená teplota ochlazované vody  $t_{v2} = 80 \text{ °C}$

$$k \times S = -\ln \left( \frac{t_{ch2} - t_{v2}}{t_{ch1} - t_{v2}} \right) \times m_{ch} \times c_{pch}$$

$$k \times S = -\ln \left( \frac{45,5 - 80}{27 - 80} \right) \times 12 \times 4181 \quad (\text{eq. 2})$$

$$k \times S = 14360,3 \text{ W/K}$$

Střední teplota ochlazované vody

$$t_{2stř} = t_{ch1} - \frac{t_{stř} - t_{v1}}{\ln \left( \frac{t_{ch1} - t_{v1}}{t_{ch1} - t_{stř}} \right)}$$

$$t_{2stř} = 27 - \frac{55 - 80}{\ln \left( \frac{27 - 80}{27 - 55} \right)} \quad (\text{eq. 3})$$

$$t_{2stř} = 66,2 \text{ [°C]}$$



Sřední teplota chladicí vody

$$t_{ch, stř} = t_{2stř} + (t_{ch1} - t_{2stř}) \times e^{-\frac{k \times S}{m_{ch} \times c_{ch}}}$$

$$t_{ch, stř} = 66,2 + (27 - 66,2) \times e^{-\frac{14\,360,3}{8 \times 4\,179}} \quad (\text{eq. 4})$$

$$t_{ch, stř} = 40,7 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

**4.3. Určení součinitele přestupu tepla k**

Pro konstrukční řešení vloženého výměníku tepla volím že, bude proveden z bezešvé, hladké trubky:

TR Ø 31,8 x 4 ČSN 42 5715.01 – 17 247 (EN 1.4541) dle literatury [1.].

- Rychlost vody v trubce  $w = 0,7 \text{ [m/s]}$
- Teplota stěny trubky  $t_s = 54 \text{ [}^\circ\text{C]}$

Výpočet Reynoldsova kritéria Re

Kinematická viskozita chladicí vody je určena pro teplotu  $t_{ch, stř} = 40,7 \text{ }^\circ\text{C}$  dle literatury [12.].

Kinematická viskozita chladicí vody  $\nu = 0,6510 \times 10^{-6} \text{ [m}^2 \times \text{s}^{-1}]$ .

$$Re = \frac{w \times d}{\nu}$$

$$Re = \frac{0,7 \times 23,8 \times 10^{-3}}{0,6510 \times 10^{-6}} \quad (\text{eq. 5})$$

$$Re = 25\,591 \text{ [-]}$$

Protože platí, že  $Re > 2\,320$  a zároveň  $Re > 13\,800$  jedná se o čistě turbulentní proudění.

**I. Výpočet součinitele přestupu tepla na straně chladicí vody  $\alpha_1$** Výpočet Nusseltova kritéria Nu pro turbulentní proudění v trubce**Podle Petukhova**

$$f = \frac{1}{(1,82 \times \log(Re) - 1,64)^2}$$

$$f = \frac{1}{(1,82 \times \log(25\,591) - 1,64)^2} \quad (\text{eq. 6})$$

$$f = 0,024546$$

Prandtlovo číslo  $Pr = 4,27[-]$ , je určeno pro teplotu chladicí vody  $t_{ch, stř} = 40,7 [^{\circ}C]$ ,

$$Nu = \frac{1}{8} \times \frac{f \times Re \times Pr}{1,07 + 12,7 \times \sqrt{\frac{1}{8} \times f \times \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}}$$
$$Nu = \frac{1}{8} \times \frac{0,024546 \times 25\,591 \times 4,27}{1,07 + 12,7 \times \sqrt{\frac{1}{8} \times 0,024546 \times \left(4,27^{\frac{2}{3}} - 1\right)}} \quad (\text{eq. 7})$$

$$Nu = 170 [-]$$

### **Podle Dittus – Boeltera**

Dynamická viskozita  $\eta = 0,639 \times 10^{-3} [\text{Pa/s}]$ , je určeno pro teplotu chladicí vody  $t_{ch, stř} = 40,7 [^{\circ}C]$ .

Dynamická viskozita chladicí vody na stěně trubky  $\eta_w = 0,6391 \times 10^{-3} [\text{Pa/s}]$ , je určeno pro teplotu  $t_s = 53,45 [^{\circ}C]$ .

$$Nu = 0,0243 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,4} \times \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)$$
$$Nu = 0,0243 \times 25\,591^{0,8} \times 4,27^{0,4} \times \left(\frac{0,6391 \times 10^{-3}}{0,5194 \times 10^{-3}}\right) \quad (\text{eq. 8})$$

$$Nu = 180 [-]$$

V následujících výpočtech bude použito Nusseltovo číslo  **$Nu = 173[-]$** . Tato hodnota je bližší vypočtené hodnotě pomocí kritéria podle Petukhova, z důvodu že se více blíží k experimentálním (reálným) hodnotám.

### Výpočet součinitele přestupu tepla $\alpha_1$ na straně chladicí vody

Součinitel tepelné vodivosti chladicí vody  $\lambda = 0,635 [\text{W/m}\times\text{K}]$  je určen pro teplotu  $t_{ch, stř} = 40,7 [^{\circ}C]$ .

$$\alpha_1 = Nu \times \frac{\lambda}{d}$$
$$\alpha_1 = 173 \times \frac{0,635}{0,0238} \quad (\text{eq. 9})$$

$$\alpha_1 = 4\,615,8 [\text{W} \times \text{m}^{-2} \times \text{K}^{-1}]$$

**II. Výpočet součinitele přestupu tepla na straně ochlazované vody  $\alpha_2$** Výpočet Grashofova kritéria Gr

Kinematická viskozita ochlazované vody  $\nu_v = 0,4366 \times 10^{-6} \text{ [m}^2 \times \text{s}^{-1}\text{]}$  je určena pro teplotu  $t_{2\text{stř}} = 66,2 \text{ [}^\circ\text{C}\text{]}$ .

$$\text{Gr} = \frac{g \times D^3}{\nu_v^2} \times \gamma \times \Delta t$$

$$\text{Gr} = \frac{9,81 \times 0,0318^3}{(0,4366 \times 10^{-6})^2} \times 0,425 \times 10^{-3} \times (66,2 - 40,7) \quad (\text{eq. 10})$$

$$\text{Gr} = 17\,935\,439 \text{ [-]}$$

Výpočet Rayleighova kritéria Ry

Prandtlovo číslo  $\text{Pr} = 2,74$  je určeno pro teplotu ochlazované vody  $t_{2\text{stř}} = 66,2 \text{ [}^\circ\text{C}\text{]}$ .

$$\text{Ry} = \text{Gr} \times \text{Pr}$$

$$\text{Ry} = 17\,935\,439 \times 2,74 \quad (\text{eq. 11})$$

$$\text{Ry} = 49\,143\,103 \text{ [-]}$$

Výpočet Nusseltova kritéria pro horizontální trubku

$$\text{Nu} = \left( \frac{0,6 + \frac{0,387 \times (\text{Ry})^{\frac{1}{6}}}{\left( 1 + 0,721 \times \left( \frac{1}{\text{Pr}} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}}}{\left( 1 + 0,721 \times \left( \frac{1}{\text{Pr}} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$
$$\text{Nu} = \left( \frac{0,6 + \frac{0,387 \times (49\,143\,103)^{\frac{1}{6}}}{\left( 1 + 0,721 \times \left( \frac{1}{2,74} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}}}{\left( 1 + 0,721 \times \left( \frac{1}{2,74} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad (\text{eq. 12})$$

$$\text{Nu} = 53,2 \text{ [-]}$$

Pro další výpočet bude použito Nusseltovo číslo **Nu = 53** [-].

Výpočet součinitele přestupu tepla  $\alpha_2$  na straně ochlazované vody

Součinitel tepelné vodivosti ochlazované vody  $\lambda_v$  je určen pro teplotu  $t_{2stř} = 66,2$  [°C].

$$\alpha_2 = Nu \times \frac{\lambda_v}{D}$$

$$\alpha_2 = 53 \times \frac{0,660}{0,0318} \quad (\text{eq. 13})$$

$$\alpha_2 = 1\,100 \text{ [W} \times \text{m}^{-2} \times \text{K}^{-1}]$$

**III. Výpočet součinitele prostupu tepla k**

Součinitel tepelné vodivosti trubky výměníku tepla  $\lambda_{oc} = 50$  [W  $\times$  m<sup>-1</sup>  $\times$  K<sup>-1</sup>] volen dle [2.]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda_{oc}} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{4\,615,8} + \frac{0,004}{50} + \frac{1}{1\,100}} \quad (\text{eq. 14})$$

$$k = 829,4 \text{ [W} \times \text{m}^{-2} \times \text{K}^{-1}]$$

**4.4. Výpočet a návrh rozměrů výměníku**Výpočet velikosti plochy výměníku tepla

$$S = \frac{k \times S}{k}$$

$$S = \frac{14\,360,3}{829,4} \quad (\text{eq. 15})$$

$$S = 17,3 \text{ [m}^2\text{]}$$

Teplosměnná plocha výměníku tepla bude dimenzována pro případ zhoršeného tepelného toku. Vypočtená plocha bude navýšena o 1/3 na  $S = 23$  [m<sup>2</sup>]

Výpočet a návrh počtu hadů chladicího registru

Hustota chladicí vody  $\rho$  je určena pro teplotu  $t_{ch,stf} = 40,7$  [°C].

$$h = \frac{m_{ch}}{\frac{\pi \times d^2}{4} \times w \times \rho}$$

$$h = \frac{8}{\frac{\pi \times 0,0238^2}{4} \times 0,7 \times 991,9} \quad (\text{eq. 16})$$

$$h = 25,9 \text{ [ks]}$$

Pro samotnou zvolenou konstrukci směšovací, kondenzační nádoby je neefektivní volit velké množství teplosměnných hadů nad sebou z důvodu vysoké hladiny chladicí vody v prostoru tlakové nádoby a nerovnoměrnému rozložení teplotního pole. Proto volím, že vložený chladič bude obsahovat 8 [ks] teplosměnných hadů. Pro dodržení požadované velikosti teplosměnné plochy, bude navýšená délka teplosměnných hadů.

Výpočet délky jednoho hadu výměníku tepla

$$l = \frac{S}{\pi \times D \times h}$$

$$l = \frac{23}{\pi \times 0,0318 \times 8} \quad (\text{eq. 17})$$

$$l = 28,8 \text{ [m]}$$

Volím, že teplosměnný had bude proveden na délku  $l = 29$  [m].

#### 4.5. Návrh hlavních rozměrů kondenzační nádoby

##### Výpočet objemu nádrže

Paroplynová směs přivedena do směšovací, kondenzační nádrže, předává své teplo chladicí vodě, kterou je nádrž zaplněna do 2/3. Pro efektivní kondenzaci celého množství paroplynové směsi je zapotřebí, aby bylo dostatečné množství chladicí vody v nádrži. Jelikož kondenzační nádrž je vybavená efektivnějším chladicím zařízením vodní náplně volím, že bude objem chladicí vody zmenšen o 1/5 a to na  $m_{v1} = 25\,000\text{ kg}$ .

Pro výpočet vnitřního objemu nádoby je použita hustota chladicí vody pro střední teplotu  $t_{2stř} = 66,2\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ .

$$V_B = \frac{\frac{m_{v1}}{\rho_{v1}}}{\frac{2}{3}}$$
$$V_B = \frac{\frac{25\,000}{979,89}}{\frac{2}{3}} \quad (\text{eq. 18})$$

$$V_B = 38,27\text{ [m}^3\text{]}$$

##### Výpočet rozměrů kondenzační nádoby

Volím vnitřní průměr válcové nádoby kondenzační nádrže  $D_B = 2,6\text{ [m]}$ .

##### a) Plocha kolmého řezu

$$S_B = \frac{\pi \times D_B^2}{4}$$
$$S_B = \frac{\pi \times 2,5^2}{4} \quad (\text{eq. 19})$$

$$S_B = 4,91\text{ [m}^2\text{]}$$

##### Určení délky nádoby

Výpočet délky nádoby byl proveden pomocí programů Autodesk Inventor 2019, ve výpočtu byly zohledněny eliptické dna nádoby. Vypočtený délkový rozměr nádoby je  $l_B = 7,7\text{ [m]}$ , skutečný objem nádrže  $V_{B,skut} = 38,48\text{ [m}^3\text{]}$ .

**4.6. Návrh parního kolektoru**

- Tlak vstupní páry  $p_o = 15,3 \text{ [MPa]} = 156,02 \text{ [kp} \times \text{cm}^{-2}\text{]}$
- Měrný objem vstupní páry  $v_o = 0,0100194 \text{ [m}^3\text{/kg]}$

Výpočet maximálního množství protékající páry

$$m_{\max} = 199 \times \sqrt{\frac{p_o}{v_o}}$$
$$m_{\max} = 199 \times \sqrt{\frac{156,02}{0,0100194}} \quad (\text{eq. 20})$$

$$m_{\max} = 24\,832,6 \text{ [kg/m}^2\text{s]}$$

Výpočet plochy otvoru trysky parního kolektoru

Výstupní rychlost paroplynové směsi z trysky  $u = 0,4 \text{ [m/s]}$ .

$$S_K = \frac{M_{\text{bar}}}{u \times m_{\max}}$$
$$S_K = \frac{150}{0,4 \times 24\,832,6} \quad (\text{eq. 21})$$

$$S_K = 0,0151 \text{ [m}^2\text{]}$$

Proto, aby bylo zajištěno rovnoměrné rozvedení páry do prostoru kondenzační nádrže a tím zajištění co nejlepší kondenzace paroplynové směsi. Volím, že průměr trysky parního kolektoru bude  $d_{\text{try}} = 7 \text{ [mm]}$ .

Výpočet počtu trysek parního kolektoru

$$n = \frac{4 \times S_K}{\pi \times d_{\text{try}}^2}$$
$$n = \frac{4 \times 0,0151}{\pi \times 0,007^2} \quad (\text{eq. 22})$$

$$n = 393 \text{ [ks]}$$

Z důvodu bezpečností a možného zanášení trysek volím, že celkový počet trysek bude navýšen o 1/3 a to na  $n = 533 \text{ [ks]}$ .

#### 4.7. Návrh pojistného zařízení

- Maximální tlak v nádobě  $p_{poj} = 0,9 \text{ [MPa]} = 9,17 \text{ [kp} \times \text{cm}^{-2}]$
- Měrný objem páry v prostoru nádoby  $v_{poj} = 0,214874 \text{ [m}^3/\text{kg}]$

##### Výpočet maximálního množství protékající páry pojistným zařízením

$$m_{\max,poj} = 199 \times \sqrt{\frac{p_{poj}}{v_{poj}}}$$
$$m_{\max,poj} = 199 \times \sqrt{\frac{9,17}{0,214874}} \quad (\text{eq. 23})$$

$$m_{\max,poj} = 1\,300 \text{ [kg/m}^2\text{s]}$$

##### Výpočet plochy otvoru pojistného zařízení

Výstupní rychlost paroplynové směsi do prostoru kontejnmentu  $u_{poj} = 0,8 \text{ [m/s]}$ .

$$S_{poj} = \frac{M_{bar}}{u_{poj} \times m_{\max,poj}}$$
$$S_{poj} = \frac{150}{0,8 \times 1\,300} \quad (\text{eq. 24})$$

$$S_{poj} = 0,14423 \text{ [m}^2\text{]}$$

##### Výpočet počtu průměru pojistného zařízení

$$d_{poj} = \sqrt{\frac{4 \times S_{poj}}{\pi}}$$
$$d_{poj} = \sqrt{\frac{4 \times 0,14423}{\pi}} \quad (\text{eq. 25})$$

$$d_{poj} = 0,429 \text{ [m]}$$

Pro zajištění dostatečného odvodu a spolehlivé odvodu paroplynové směsi z prostoru kondenzační nádrže tak, aby nedošlo k poškození tlakové nádoby. Volím, že budou provedeny dvě větve odvodu pojistného zařízení o průměru  $d_{poj} = 0,35 \text{ [m]}$ .



#### 4.8. Návrh použitých materiálů

Volba materiálu pro konstrukci směšovací kondenzační nádrže je volena pro konstrukční návrh primárního okruhu dle: Předpisů pro výstavbu a bezpečný provoz jaderných elektráren **PBJa-04-74**.

##### 4.8.1. Plášť kondenzační nádrže a vnitřní vestavby

Veškeré části kondenzační nádoby, které přijdou do styku s médiem primárního okruhu JE budou zhotoveny z korozivzdorné oceli X6CrNiTi18-10 – ocel chrom-niklová austenitická stabilizovaná.

##### Mechanické vlastnosti :

- Pevnost v tahu **R<sub>m</sub> = 500 – 720 [MPa]**
- Mez kluzu **R<sub>e 0,2</sub> = 200 [MPa]**
- Tažnost **A<sub>min</sub> = 40 [%]**

##### Chemické složení

C [%]	Cr [%]	Ni [%]	Ti [%]
< 0,08	17 -19	9 - 12	0,4 -0,7

##### 4.8.2. Konstrukce uložení tlakové nádoby

Konstrukce uložení tlakové nádoby bude zhotovená z konstrukční oceli S235JR – ocel konstrukční nelegovaná uklidněná.

##### Mechanické vlastnosti :

- Pevnost v tahu **R<sub>m</sub> = 360 – 510 [MPa]**
- Mez kluzu **R<sub>e 0,2</sub> = 235 [MPa]**

##### Chemické složení

C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	N [%]
0,19	1,5	0,045	0,045	0,014

#### 4.8.3. Spojovací součásti

Spojovací součásti budou provedeny z materiálu X5CrNiMo17-12-2 – ocel austenitická korozivzdorná

##### Mechanické vlastnosti:

- Pevnost v tahu  **$R_m = 490 - 700$  [MPa]**
- Mez kluzu  **$R_{e0,2} = 195$  [MPa]**

##### Chemické složení

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P max. [%]	S [%]	N [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]
< 0,08	< 1,00	< 2,00	0,045	< 0,030	< 0,11	16,50-18,50	2,00 – 2,50	10,00-13,00

#### 4.9. Pevnostní výpočet pláště kondenzační nádoby

Výpočet je proveden dle: Normy pevnostních výpočtu části reaktorů, parogenerátorů, nádob a potrubí atomových elektráren, zkušebních a výzkumných jaderných reaktorů a zařízení.

##### 2.3.1 Vstupní údaje výpočtu

- Maximální provozní přetlak nádoby  **$p_{ba,prac} = 0,89$  [MPa]**
- Maximální provozní teplota  **$t_{ba,prac} = 175$  [°C]**
- Teplota při tlakové zkoušce  **$t_{ba,zk} = 20$  [°C]**

Plášť tlakové nádoby směšovací, kondenzační nádrže bude zhotoven z korozivzdorné oceli X6CrNiTi18-10.

Redukční součinitel pro 175 [°C] : mez pevnosti  $k_{Rm} = 0,85525$ ; pro mez kluzu  $k_{Re0,2} = 1$

Materiál	$t_{ba,zk} = 20$ [°C]		$t_{ba,prac} = 175$ [°C]	
	$\sigma_{Rm}$ [MPa]	$\sigma_{Re0,2}$ [MPa]	$\sigma_{Rm}$ [MPa]	$\sigma_{Re0,2}$ [MPa]
<b>X6CrNiTi18-10</b>	700	200	599	200

A. Dimenzování mechanických vlastností oceli při  $t_{ba,prac} = 175$  [°C]**Dovolené napětí pro mez pevnosti**

Součinitel bezpečnosti pro mez pevnosti  $n_{Rm} = 2,6$  [-]

$$\sigma_N = \frac{\sigma_{Rm}}{n_{Rm}}$$

$$\sigma_N = \frac{599}{2,6} \quad (\text{eq. 26})$$

$$\sigma_N = 230 \text{ [MPa]}$$

**Dovolené napětí pro mez kluzu**

Součinitel bezpečnosti pro mez kluzu  $n_{Re0,2} = 1,5$  [-]

$$\sigma_N = \frac{\sigma_{Re0,2}}{n_{Re0,2}}$$

$$\sigma_N = \frac{200}{1,5} \quad (\text{eq. 27})$$

$$\sigma_N = 133 \text{ [MPa]}$$

Volím, že pro další výpočty bude použito dovolené napětí  $\sigma_N = 133$  [MPa].

B. Dimenzování mechanických vlastností oceli při  $t_{ba,zk} = 20$  [°C]**Dovolené napětí pro mez pevnosti**

Součinitel bezpečnosti pro mez pevnosti  $n_{Rm} = 2,6$  [-]

$$\sigma_N = \frac{\sigma_{Rm}}{n_{Rm}}$$

$$\sigma_N = \frac{700}{2,6} \quad (\text{eq. 28})$$

$$\sigma_N = 269 \text{ [MPa]}$$

**Dovolené napětí pro mez kluzu**

Součinitel bezpečnosti pro mez kluzu  $n_{Re0,2} = 1,5$  [-]

$$\sigma_N = \frac{\sigma_{Re0,2}}{n_{Re0,2}}$$

$$\sigma_N = \frac{200}{1,5} \quad (\text{eq. 29})$$

$$\sigma_N = 133 \text{ [MPa]}$$

Volím, že pro další výpočty bude použito dovolené napětí  $\sigma_N = 133$  [MPa].

**C. Dovolené napětí při hydraulické zkoušce**

$$\sigma_{N,zk} = 1,35 \times \sigma_N$$

$$\sigma_{N,zk} = 1,35 \times 133 \quad (\text{eq. 30})$$

$$\sigma_{N,zk} = 180 \text{ [MPa]}$$

**D. Výpočet nejmenšího dovoleného zkušebního přetlaku**

$$p_Z = 1,25 \times p_{ba,prac} \times \frac{\sigma_{N,zk}}{\sigma_N}$$

$$p_Z = 1,25 \times 0,89 \times \frac{180}{133} \quad (\text{eq. 31})$$

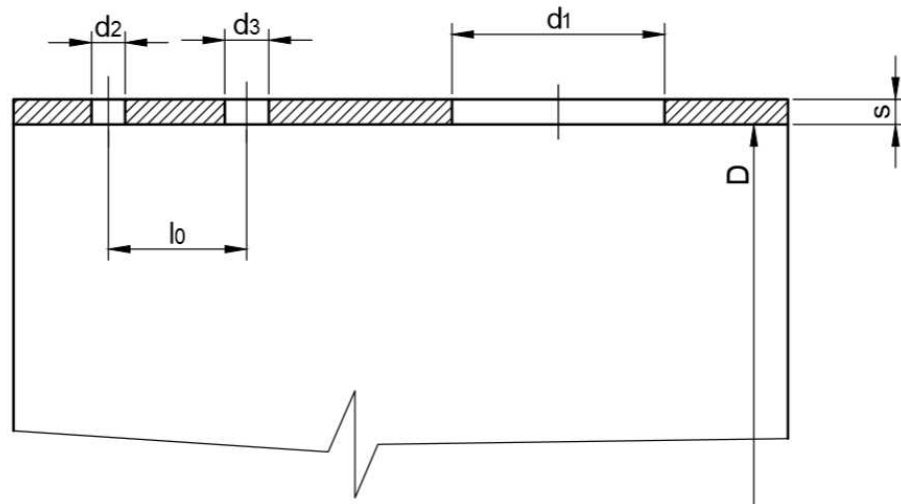
$$p_Z = 1,51 \text{ [MPa]}$$

Volím, že hydraulická tlaková zkouška bude provedena pro tlak  $p_Z = 1,6$  [MPa].

#### 4.9.1. Výpočet pláště kondenzační nádrže na vnitřní přetlak

##### Vstupní údaje:

- Tloušťka stěny pláště tlakové nádoby  $s_n = 18$  [mm]
- Vnitřní průměr tlakové nádoby  $D_B = 2\,600$  [mm]
- Vnější průměr tlakové nádoby  $D_S = 2\,636$  [mm]
- Vnější průměr servisního vlezu  $d_1 = 881$  [mm]
- Průměr odvodu paroplynové směsi  $d_2 = 60$  [mm]
- Průměr přívodu dusíku  $d_3 = 45$  [mm]
- Rozteč mezi nátrubky  $l_0 = 300$  [mm]
- Rozdíl tloušťky plechu dle ČSN EN 10029  $c = 1,4$  [mm]



Obr. 4.9.1.1. Schéma rozdělení otvorů oslabující plášť tlakové nádoby [autor]

##### Výpočet nejmenší hodnoty součinitele oslabení pláště

$$\varphi_0 = \frac{p_{ba,prac} \times [D_B + (s_n - c)]}{2 \times (s_n - c) \times \sigma_N}$$

$$\varphi_0 = \frac{0,89 \times [2\,600 + (18 - 1,4)]}{2 \times (18 - 1,4) \times 133} \quad (\text{eq. 32})$$

$$\varphi_0 = 0,53 \text{ [-]}$$

Výpočet koeficientu pevnosti podélné řady otvorů

Jestli platí:

$$a < 2 \times \sqrt{D_S \times (s_n - c)}$$

$$247,5 < 2 \times \sqrt{2\,636 \times (18 - 1,4)} \quad (\text{eq. 33})$$

$$247,5 < 418,4$$

Vztah platí pak otvor se posuzuje jako řada.

$$d = \frac{d_2 + d_3}{2}$$

$$d = \frac{60 + 45}{2} \quad (\text{eq. 34})$$

$$d = 52,5 \text{ [mm]}$$

$$\varphi = \frac{l_0 - d}{l_0}$$

$$\varphi = \frac{300 - 52,5}{300} \quad (\text{eq. 35})$$

$$\varphi = 0,825$$

Platí, že  $\varphi > \varphi_0$  proto je nutno zjistit mezní velikost průměru nevyztuženého otvoru, při podmínce:  $\varphi_0 < \frac{2}{3}$ ;  $0,53 < \frac{2}{3}$ . Podmínka platí pak:

$$d_{\text{mez}} = 2 \times \left( \frac{1}{\varphi_0} - 1 \right) \times \sqrt{D_S \times (s_n - c)}$$

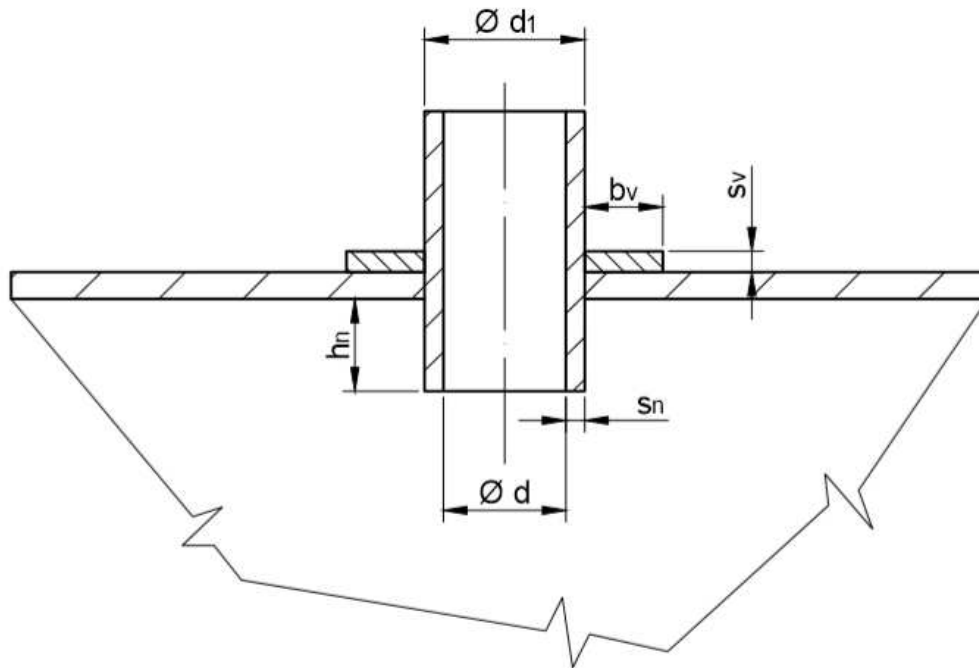
$$d_{\text{mez}} = 2 \times \left( \frac{1}{0,53} - 1 \right) \times \sqrt{2\,636 \times (18 - 1,4)} \quad (\text{eq. 36})$$

$$d_{\text{mez}} = 371 \text{ [mm]}$$

Ze vztahu  $d_1 > d_{\text{mez}}$  je zřejmé, že je nutné otvor vyztužit. "

Vyztužení nátrubku

- Tloušťka stěny pláště servisního vlezu  $s_n = 18$  [mm]
- Vnější průměr servisního vlezu  $d_1 = 881$  [mm]
- Vnitřní průměr servisního vlezu  $d = 845$  [mm]



Obr. 4.9.1.2. Schéma vyztužení servisního vlezu tlakové nádoby [autor]

Výpočet šířky prstence pro výztuhu

Volím tloušťku prstence výztuhy servisního vlezu  $s_v = 16$  [mm].

$$b_v = \sqrt{D_S \times (s_n + s_v - c)}$$

$$b_v = \sqrt{2\,636 \times (18 + 16 - 1,4)} \quad (\text{eq. 37})$$

$$b_v = 293 \text{ [mm]}$$

Volím, že šířka výztuhy bude provedena  $b_v = 300$  [mm].

Výpočet vyztužené části nátrubku servisního vlez

$$h_n = \sqrt{(d_1 - s_n) \times (s_n - c)}$$

$$h_n = \sqrt{(881 - 18) \times (18 - 1,4)} \quad (\text{eq. 38})$$

$$h_n = 120 \text{ [mm]}$$

Výpočet minimální tloušťky stěny nátrubku

Koeficient oslabení stěny  $\varphi = 1$ .

$$s_{on} = \frac{p_{ba,prac} \times d}{2 \times \varphi \times \sigma_N - p_{ba,prac}}$$

$$s_{on} = \frac{0,89 \times 845}{2 \times 1 \times 133 - 0,89} \quad (\text{eq. 39})$$

$$s_{on} = 2,8 \text{ [mm]}$$

Výpočet výstužné plochy

Volím výšku spodní části nátrubku  $h_n' = 90 \text{ [mm]}$

$$f_{n1} = 2 \times h_n \times (s_n - s_{on} - c) = 2 \times 120 \times (18 - 2,8 - 1,4) = 3\,312 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$f_{n2} = 2 \times h_n' \times (s_n - c) = 2 \times 90 \times (18 - 1,4) = 2\,988 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{eq. 40})$$

$$f_v = 2 \times b_v \times s_v = 2 \times 293 \times 16 = 9\,376 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\sum f = f_{n1} + f_{n2} + f_v = 3\,312 + 2\,988 + 9\,376 = 15\,676 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Koeficient oslabení stěny  $\varphi = 1$ .

$$s_o = \frac{p_{ba,prac} \times D_B}{2 \times \varphi \times \sigma_N - p_{ba,prac}}$$

$$s_o = \frac{0,89 \times 2\,600}{2 \times 1 \times 133 - 0,89} \quad (\text{eq. 41})$$

$$s_o = 8,7 \text{ [mm]}$$

Plocha řezu vyztužujícího elementu musí vyhovět podmínce:

$$\sum f \geq (d - d_{mez}) \times s_o$$

$$15\,676 \geq (845 - 371) \times 8,7 \quad (\text{eq. 42})$$

$$15\,676 \geq 4\,123,8$$

**Podmínka je dodržena.**



Výpočet koeficientu pevnosti pláště, oslabeného osamělým otvorem vyztuženým nátrubkem

$$\varphi = \frac{2}{2 + \frac{d_1}{\sqrt{D_s \times (s_n - c)}}}$$

$$\varphi = \frac{2}{2 + \frac{881}{\sqrt{2\,636 \times (18 - 1,4)}}} \quad (\text{eq. 43})$$

$$\varphi = 0,32 \quad [-]$$

$$\varphi' = \varphi \times \left( 1 + \frac{\sum f}{2 \times s_n \times \sqrt{D_s \times (s_n - c)}} \right)$$

$$\varphi' = 0,32 \times \left( 1 + \frac{15\,676}{2 \times 18 \times \sqrt{2\,636 \times (18 - 1,4)}} \right) \quad (\text{eq. 44})$$

$$\varphi' = 0,99$$

Výpočet minimální dovolené výpočtové tloušťky válcové pláště platí pro:

$$\frac{s_n - c}{D_B} = \frac{18 - 1,4}{2\,600} = 0,0064 < 0,3 \quad (\text{eq. 45})$$

Koeficient oslabení stěny  $\varphi = 1$ .

$$s = \frac{p_{ba,prac} \times D_B}{2 \times \varphi \times \sigma_N - p_{ba,prac}} + c$$

$$s = \frac{0,89 \times 2\,600}{2 \times 1 \times 133 - 0,89} + 1,4 \quad (\text{eq. 46})$$

$$s = 10,1 \text{ [mm]}$$

**4.9.2. Výpočet pláště tlakové nádoby na vnější přetlak**Vstupní údaje:

- |   |                      |
|---|----------------------|
| • Tloušťka stěny pláště tlakové nádoby    | $s_n = 18$ [mm]      |
| • Rozdíl tloušťky plechu dle ČSN EN 10029 | $c = 1,4$ [mm]       |
| • Vnitřní průměr kondenzační nádoby       | $D_B = 2\,600$ [mm]  |
| • Vnější průměr kondenzační nádoby        | $D_S = 2\,636$ [mm]  |
| • Délka tlakové nádoby                    | $l_B = 7\,700$ [mm]  |
| • Modul pružnosti                         | $E = 200\,000$ [MPa] |

Podmínky pro použití vztahu pro výpočet nádrže na vnější přetlak

- První podmínka

$$0,005 \leq \frac{s_n - c}{D_s} \leq 0,2$$

$$0,005 \leq \frac{18 - 1,4}{2\,636} \leq 0,2 \quad (\text{eq. 47})$$

$$0,005 \leq 0,0063 \leq 0,2$$

**Vyhovuje**

- Druhá podmínka

$$\frac{D_s}{L} = \frac{2\,636}{7\,700} = 0,34 \leq 2 \quad (\text{eq. 48})$$

**Vyhovuje**Výpočet kritické délky válcového elementu

$$L_{Kr} = 1,2 \times D_s \times \sqrt{\frac{D_s}{s_n - c}}$$

$$L_{Kr} = 1,2 \times 2\,636 \times \sqrt{\frac{2\,636}{18 - 1,4}} \quad (\text{eq. 49})$$

$$L_{Kr} = 39\,860 \text{ [mm]}$$

Výpočet kritického napětí

$$\sigma_{Kr} = 1,3 \times E \times \frac{D_s}{L} \times \left( \frac{s_n - c}{D_s} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\sigma_{Kr} = 1,3 \times 200\,000 \times \frac{2\,636}{7\,700} \times \left( \frac{18 - 1,4}{2\,636} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{eq. 50})$$

$$\sigma_{Kr} = 44,5 \text{ [MPa]}$$

Určení opravného koeficientu

$$\lambda = \frac{\sigma_{Re0,2}}{\sigma_{Kr}}$$

$$\lambda = \frac{200}{44,5} \quad (\text{eq. 51})$$

$$\lambda = 4,5 \text{ [-]}$$

## Opravný koeficient

$$\xi = \frac{\lambda}{1 + \lambda}$$

$$\xi = \frac{4,5}{1 + 4,5} \quad (\text{eq. 52})$$

$$\xi = 0,82 \text{ [-]}$$

Výpočet velikosti kritického přetlaku

$$p_{Kr} = 2 \times \sigma_{Kr} \times \left( \frac{s_n - c}{D_s} \right)$$

$$p_{Kr} = 2 \times 44,5 \times \left( \frac{18 - 1,4}{2\,636} \right) \quad (\text{eq. 53})$$

$$p_{Kr} = 0,56 \text{ [MPa]}$$

Výpočet dovoleného maximálního přetlaku pro plášť tlakové nádoby

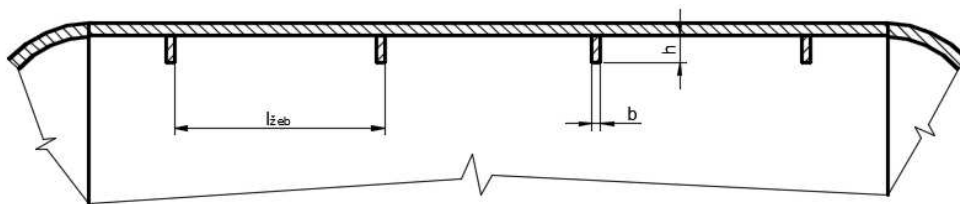
$$p_{\max} = 0,5 \times \xi \times p_{Kr}$$

$$p_{\max} = 0,5 \times 0,82 \times 0,56 \quad (\text{eq. 54})$$

$$p_{\max} = 0,23 \text{ [MPa]}$$

Jelikož při havarijním stavu může nastat situace, že v prostoru kontejnmentu dojde k nežádoucímu navýšení tlaku až na hodnoty 0,5 [MPa], je dosavadní konstrukce tlakové nádoby nevhodná. Pro zajištění stálosti konstrukce tlakové nádoby kondenzačního zařízení volím, že budou použity výztuhy vnitřními kruhovými žebry.

- Volím počet vnitřních kruhových žebër  $m = 4$  [-].
- Volím rozteč žebër  $l_{\text{žeb}} = 1\,675$  [mm].
- Moment setrvačnosti příčného řezu válcovou skořepinou  $\mu = 0,3$  [-]



Obr. 4.9.2.1. Schéma rozložení žebër vyztužení tlakové nádoby [autor]

$$I_{sk} = \frac{l_{\text{žeb}} \times (s_n - c)^3}{12 \times (1 - \mu^2)}$$

$$I_{sk} = \frac{1\,675 \times (18 - 1,4)^3}{12 \times (1 - 0,3^2)} \quad (\text{eq. 55})$$

$$I_{sk} = 701\,643 \text{ [mm}^4\text{]}$$

Vztah pro volbu tuhosti žebër  $m > 3$ 

Volím rozměry žebra: šířka  $b = 25$  [mm]; výška  $h = 65$  [mm].

$$I_r = \frac{b \times h^3}{12}$$

$$I_r = \frac{25 \times 65^3}{12} \quad (\text{eq. 56})$$

$$I_r = 572\,135 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$\left(1 + m \times \frac{I_r}{I_{sk}}\right)^{\frac{3}{4}} \leq 1 + m$$

$$\left(1 + 4 \times \frac{572\,135}{701\,643}\right)^{\frac{3}{4}} \leq 1 + 4 \quad (\text{eq. 57})$$

$$2,97 \leq 5$$

### **Vyhovuje**

#### Výpočet kritického napětí

$$\sigma_{Krv} = 1,3 \times E \times \frac{D_s}{L} \times \left(\frac{s_n - c}{D_s}\right)^{\frac{3}{2}} \times \left(1 + m \times \frac{I_r}{I_{sk}}\right)^{\frac{3}{4}}$$
$$\sigma_{Krv} = 1,3 \times 200\,000 \times \frac{2\,636}{7\,700} \times \left(\frac{18 - 1,4}{2\,636}\right)^{\frac{3}{2}} \times \left(1 + 4 \times \frac{572\,135}{701\,643}\right)^{\frac{3}{4}} \quad (\text{eq. 58})$$

$$\sigma_{Krv} = 132 \text{ [MPa]}$$

#### Výpočet kritického přetlaku tlakové nádoby

$$p_{Krv} = 2 \times \sigma_{Krv} \times \left(\frac{s_n - c}{D_s}\right)$$
$$p_{Krv} = 2 \times 132 \times \left(\frac{18 - 1,4}{2\,636}\right) \quad (\text{eq. 59})$$

$$p_{Krv} = 1,66 \text{ [MPa]}$$

#### Výpočet dovoleného maximálního vnějšího přetlaku pro plášť tlakové nádoby

$$p_{\max} = 0,5 \times \xi \times p_{Krv}$$
$$p_{\max} = 0,5 \times 0,82 \times 1,66 \quad (\text{eq. 60})$$

$$p_{\max} = 0,68 \text{ [MPa]}$$

Zvolena tloušťka stěny pláště  $s_n = 18$  [mm] s použitím 4 [ks] podpůrných výstužných žebër vyhovuje pevnostnímu výpočtu tlakové nádoby. Splňuje pevnostní podmínky pro parametry okolního prostředí kolem tlakové nádoby kondenzační nádrže.

## 5. Volba použití vhodné tvarové varianty vnitřního výměníku tepla

Pro zajištění spolehlivé a efektivní funkce kondenzačního zařízení v souboru zařízení kompenzace objemu chladiva, je třeba při konstrukci tohoto zařízení volit použité technologické zařízení tak, aby byla zaručená maximální provozní spolehlivost a výkonnost při různých provozních stavech. Jedním z nejdůležitějších zařízení kondenzační nádoby je vnitřní výměník tepla, který zajišťuje odvod tepelné energie z prostoru tlakové nádoby. Při volbě parametru výměníku tepla je zapotřebí zvážit velké množství zadaných parametru.

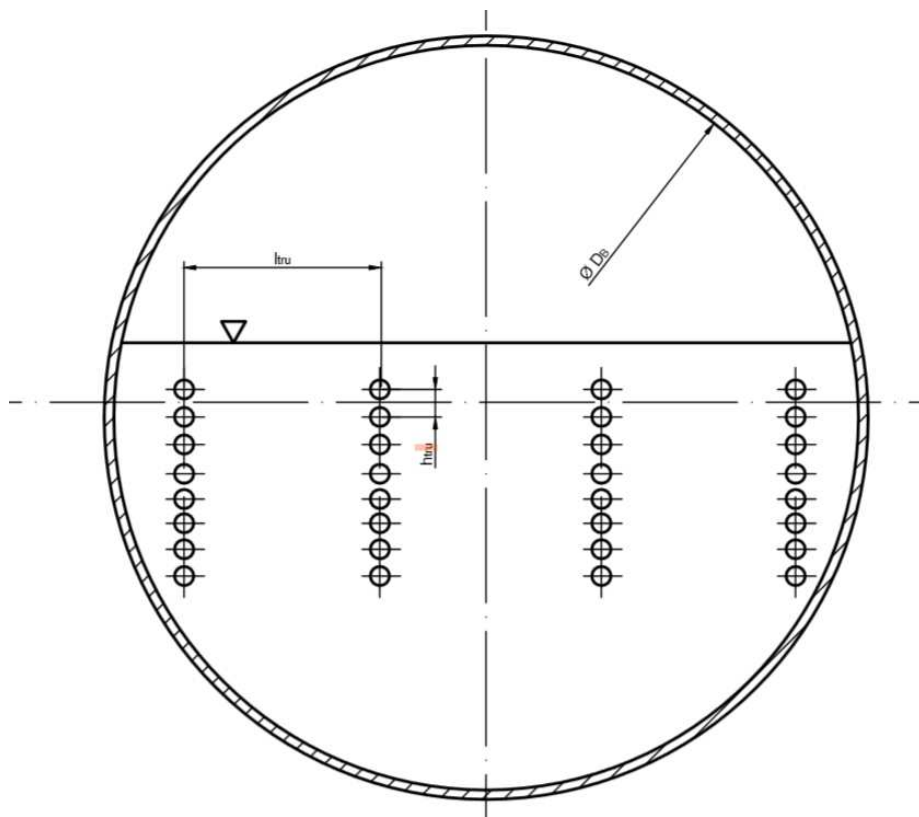
### 5.1. Základní požadavky pro použití vhodného typu výměníku tepla

Pro správnou funkci zařízení a samotného výměníku tepla je třeba co nejvíce se přiblížit základním požadavkům pro provoz výměníku tepla:

- **pravidelný a spolehlivý provoz** – je třeba zajistit, aby nedocházelo k zanášení teplosměnných ploch výměníku tepla a tím se zamezilo poklesu hodnot součinitele přestupu tepla. Nedílnou součástí tohoto požadavku je zajištění co nejmenší degradace materiálu výměníku tepla a tím nedocházelo k zmenšování teplosměnné plochy díky zaslepování jednotlivých teplosměnných hadu výměníku.
- **co největší součinitel prostupu tepla** – pro dosažení co největšího odvodu tepla z prostoru chladicí vody nádrže při zachování co nejkompaktnějších rozměrů výměníku tepla.
- **homogenní teplotní pole v celém průřezu** – je snaha docílit homogenního teplotního pole v celém průřezu, aby nedocházelo k příliš značným tepelným pnutím v součástech vybavení kondenzační nádoby.
- **co nejmenší tlakové ztráty** – z rostoucí tvarovou členitostí a rostoucími délkami teplosměnných trubek, roste také tlaková ztráta zařízení a tím i čerpací práce. Je snahou docílit, aby čerpací práce byla co nejmenší a tím i provozní náklady.

**5.2. Výběr tvarových variant výměníku tepla pro následné modelování a použití****a) Rekuperační výměník s teplosměnnými hady seřazenými nad sebou (varianta č.1)**

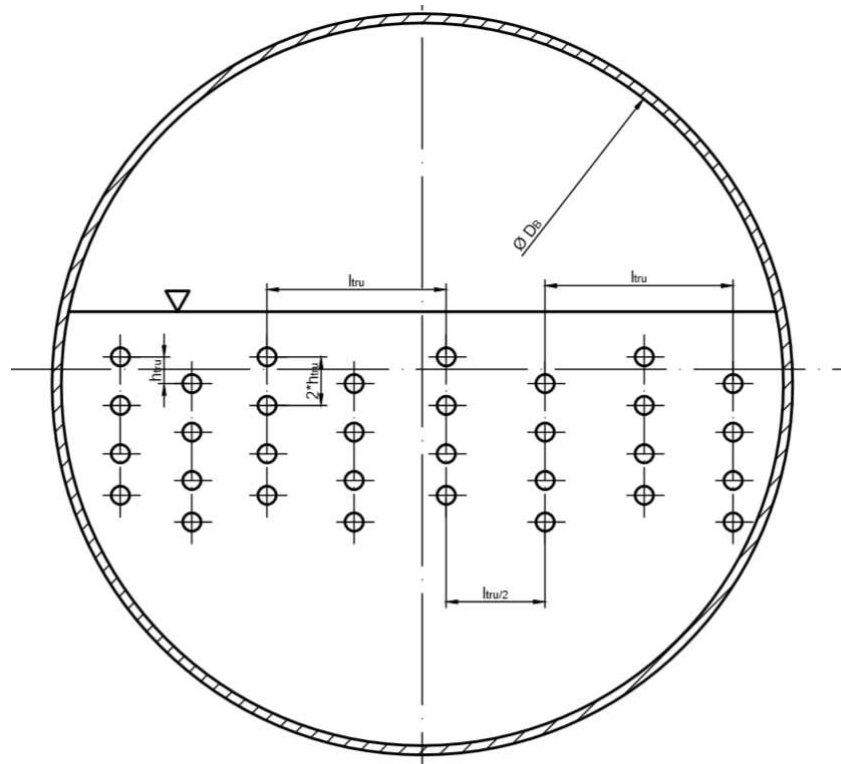
Teplosměnné trubky výměníku tepla jsou rovnoměrně seřazené nad sebou a jejich svislý průmět do vodorovné roviny je totožný. Celkový počet teplosměnných hadů je 8 [ks] a jejich geometrický tvar je totožný. Teplosměnný had je tvořen bezešvou, hladkou trubicí  $\varnothing 31,8 \times 4$  o celkové délce 28,8 [m].



Obr. 5.2.1. Schéma tvarové varianty výměníku tepla varianty č. 1. [autor]

b) Rekuperační výměník s přesazenými teplosměnnými hady s stejným tvarem (varianta č.2)

Teplosměnné trubky výměníku tepla jsou rovnoměrně přesazené od sebe o rozměr  $l_{pr}$ , jejich svislý průmět do vodorovné roviny je různý, přičemž průmět každé druhé řady je totožný. Celkový počet teplosměnných hadů je 8 [ks] a jejich geometrický tvar je totožný. Teplosměnný had je tvořen bezešvou, hladkou trubicí  $\varnothing 31,8 \times 4$  o celkové délce 28,8 [m].

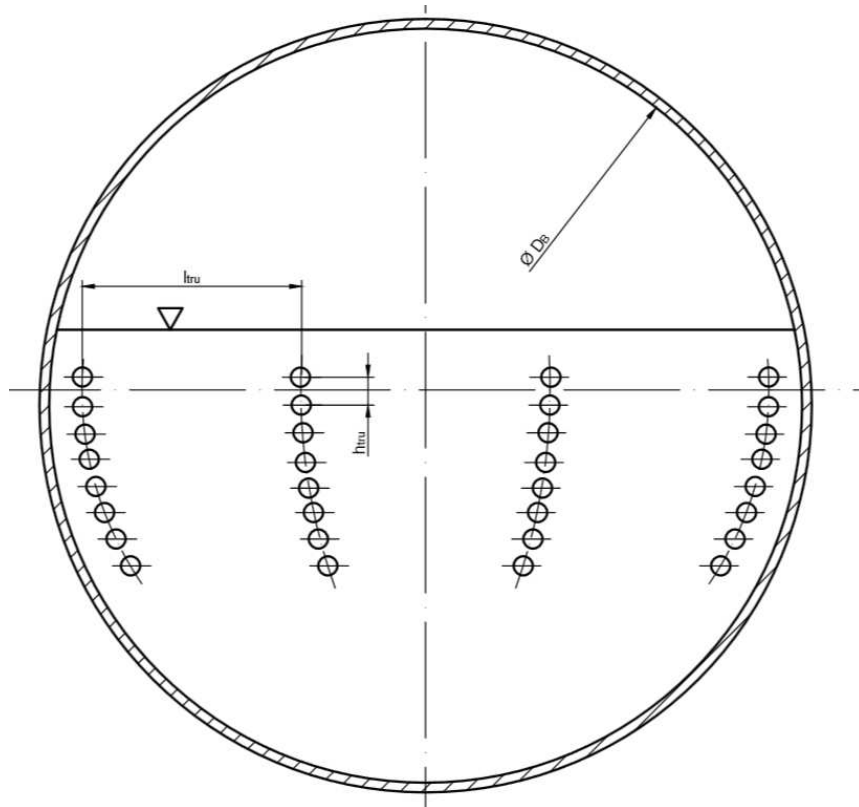


Obr. 5.2.2. Schéma tvarové varianty výměníku tepla varianty č. 2. [autor]



c) Rekuperační výměník s přesazenými teplosměnnými hady s různým tvarem (varianta č. 3)

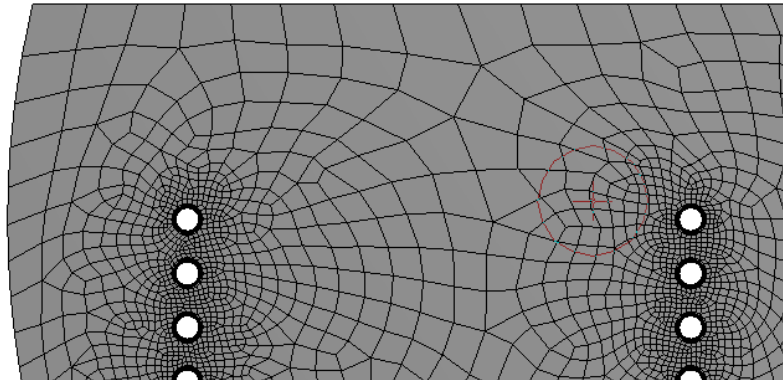
Teplosměnné trubky výměníku tepla jsou přesazené od sebe o rozměr  $l_{př1}$ , jejich svislý průmět do vodorovné roviny je různý. Celkový počet teplosměnných hadů je 8 [ks] a jejich geometrický tvar je odlišný. Teplosměnný had je tvořen bezešvou, hladkou trubicí  $\varnothing 31,8 \times 4$  o celkové délce 28,8 [m].



Obr. 5.2.3. Schéma tvarové varianty výměníku tepla varianty č. 3. [autor]

### 5.3. Postup řešení matematického modelu v programu ANSYS FLUENT

Výpočet a modelování zadaných tvarových variant výměníku tepla byl proveden za pomoci programu Ansys Fluent 2019 R1. Pro jednotlivé tvarové varianty byl vytvořen samostatný projekt, kde v první řadě byla provedena tvorba geometrie tvořící příčný řez kondenzační nádrže. V dalším kroku byla vytvořena výpočetní síť, která byla zhuštěna v oblasti kolem teplosměnných trubek za účelem přesnějšího výpočtu a modelu.



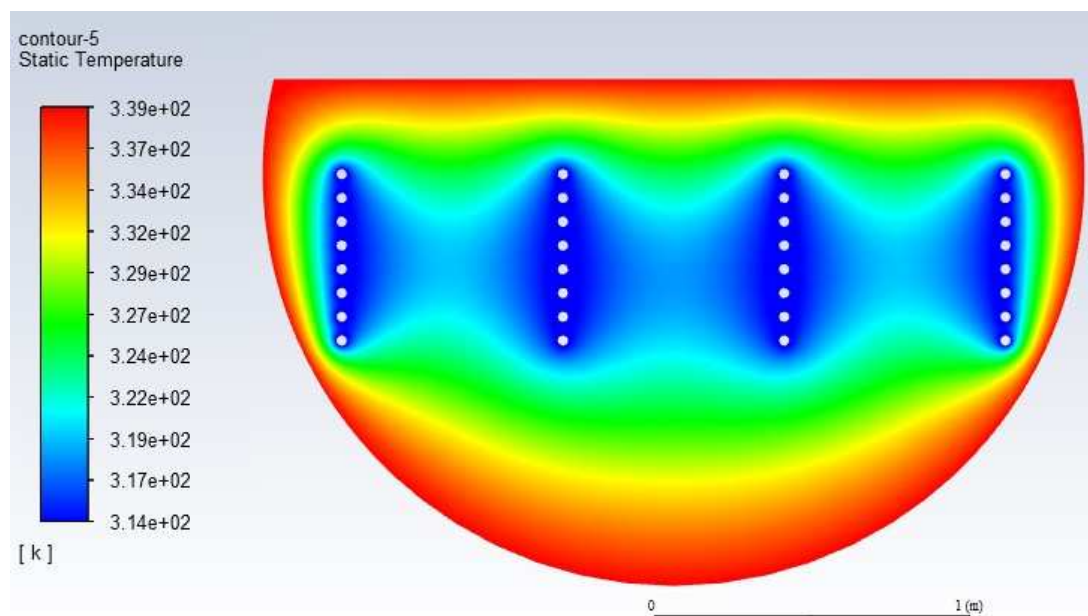
Obr. 5.3.1. Detail výpočetní sítě v oblasti okolo teplosměnných trubek [autor]

Následně bylo provedeno pojmenování okrajových podmínek dané geometrie. Před provedením výpočtu byly definovány parametry určující výpočet a určené okrajové podmínky. Následně byl proveden výpočet a vyhodnoceny výsledky.

### 5.3.1 Vyhodnocení výsledku výpočtu a modelu varianty č. 1.

Zadaný výpočetní model byl proveden pro provozní stav, kdy veškeré množství přepuštěného obsahu paroplynové směsi z KO, bylo vyexpandováno do obsahu chladicí vody nádrže a bylo ustáleno v rovnovážném stavu.

Výsledné teplotní pole pro první tvarovou variantu výměníku tepla je na první pohled v celém průřezu v oblasti teplosměnných trubek relativně homogenní. Teplota ochlazované demineralizované vody se zvyšuje s narůstající vzdáleností od středu talkové nádoby. Mezi jednotlivými větvemi teplosměnných hadu je teplota ochlazované vody vyšší než v oblasti okolo teplosměnných trubek. Rozdíl hodnot těchto teplot je asi 8 [°C]. Teplota chladicí vody v oblasti přívodu paroplynové směsi se pohybuje okolo 62 [°C]. Teplota v oblasti teplosměnných hadu se blíží hodnotě 41,5 [°C].

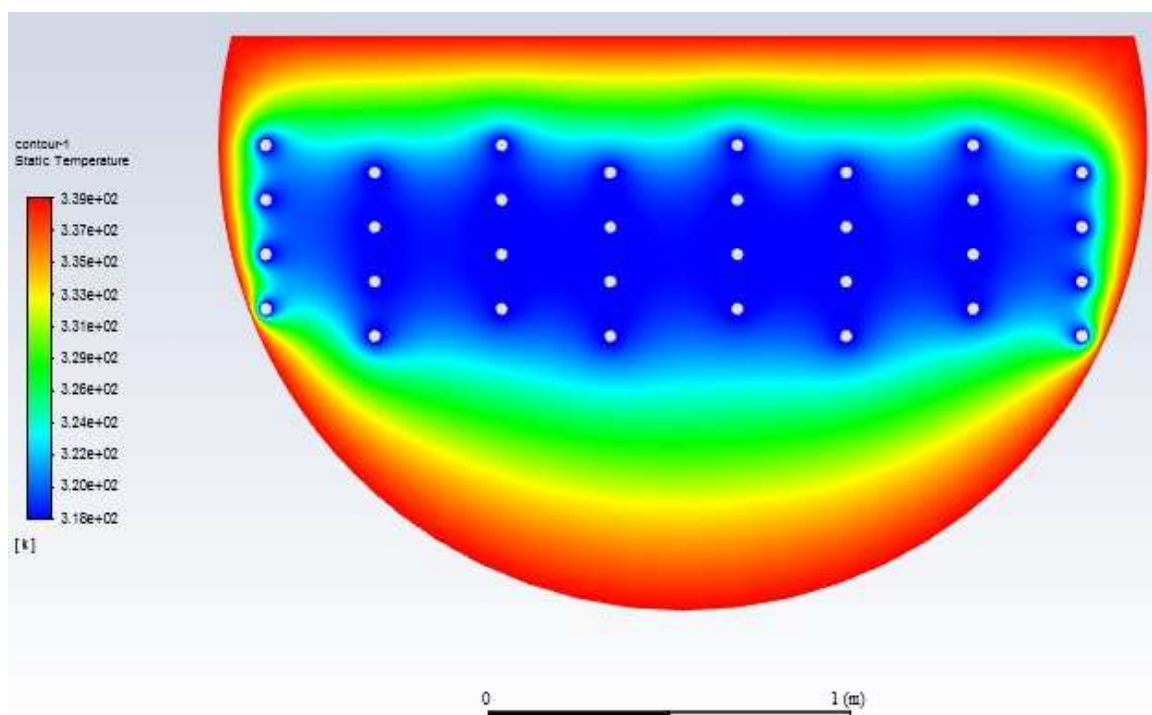


Obr. 5.3.1.1. Schéma vypočteného teplotního pole pro variantu č. 1. [autor]

### 5.3.2 Vyhodnocení výsledku výpočtu a modelu varianty č. 2.

Zadaný výpočetní model byl proveden pro provozní stav, kdy veškeré množství přepuštěného obsahu paroplynové směsi z KO, bylo vyexpandováno do obsahu chladicí vody nádrže a bylo ustáleno v rovnovážném stavu.

Teplotní pole vygenerované pro druhou tvarovou variantu výměníku tepla je výrazně stejnorodější v oblasti středu modelu. Teplota chladicí vody kolem stěn teplosměnných hadů je zde vyšší než u prvního modelu o 4 [°C]. Tím se docílí zvýšení hodnot celkového součinitele prostupu tepla  $k$ . Naproti tomu teplota ochlazované vody v oblasti okolo teplosměnných hadů a mezi nimi dosahuje maximálních hodnot 48 [°C]. Tato teplota je oproti tvarové variantě č. 1. o 3[°C] nižší. Teplota chladicí vody v oblasti přívodu paroplynové směsi v průměru nabývá hodnot okolo 59[°C].

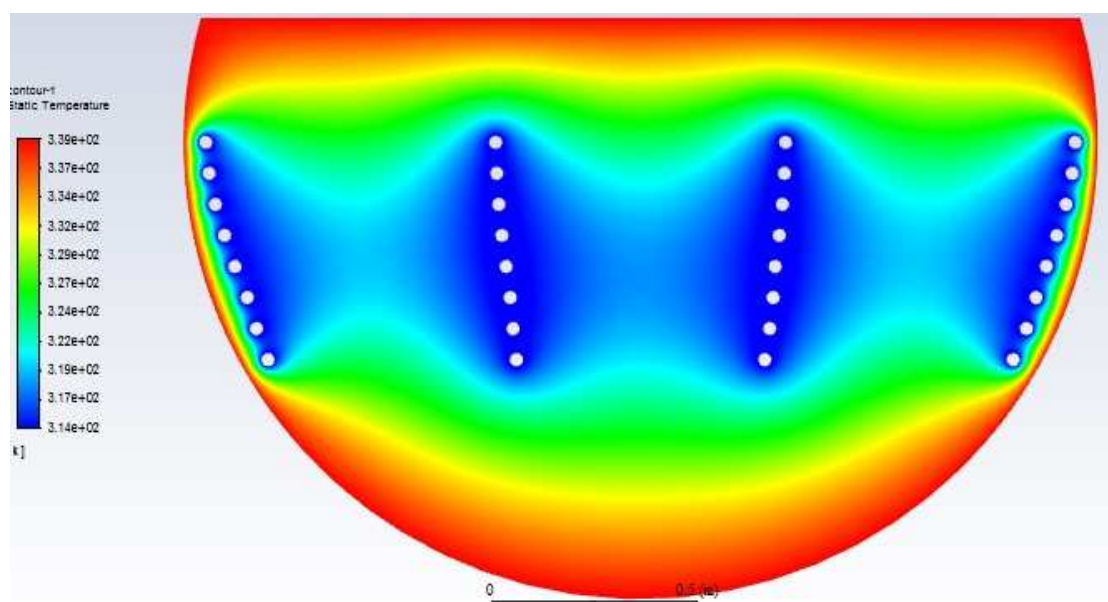


Obr. 5.3.2.1. Schéma vypočteného teplotního pole pro variantu č. 2. [autor]

### 5.3.3 Vyhodnocení výsledku výpočtu a modelu varianty č. 3.

Zadaný výpočetní model byl proveden pro provozní stav, kdy veškeré množství přepuštěného obsahu paroplynové směsi z KO, bylo vyexpandováno do obsahu chladicí vody nádrže a bylo ustáleno v rovnovážném stavu.

Pro třetí tvarovou variantu výměníku tepla byl vygenerován model. Výsledkem tohoto výpočtu je dané teplotní pole, toto teplotní pole je obdobné jako teplotní pole varianty č. 1. Oproti variantě č. 1. je oblast mezi teplosměnnými hady na nižší teplotní úrovni v průměru o 1 [°C]. Oblast okolo bočních stěn tlakové nádoby výrazně klesla na své tepelné hodnotě na 56 [°C] a zúžilo se i pásmo, kde nabývá chladicí voda vysokých hodnot teploty. Teplota v oblasti přívodu paroplynové směsi je v průměru o 2 [°C] nižší než u varianty č. 1. a varianty č. 2.



Obr. 5.3.3.1. Schéma vypočteného teplotního pole pro variantu č. 3. [autor]

#### 5.4 Srovnání a výběr použité tvarové varianty vnitřního výměníku tepla

Z výsledků modelování jednotlivých tvarových variant vnitřního výměníku tepla, jsem po zhodnocení výsledných modelu zvolil variantu výměníku, která bude použita pro konstrukci kondenzační nádoby. Pro konečnou konstrukci tohoto bezpečnostního zařízení bude použita druhá tvarová varianta výměníku tepla. Důvody pro použití druhé tvarové varianty jsou:

- dosažení rovnoměrnějšího teplotního pole v celém průřezu
- dosažení většího rozdílu teplot medii  $t_i$  i většího součinitele přestupu tepla  $k$
- dosažení nižších teplot v oblasti přívodu paroplynové směsi
- relativně jednoduchá konstrukce výměníku tepla

#### 5.5 Výpis dat výpočtů jednotlivých tvarových variant výměníku

##### 5.5.1 Rekuperační trubkový výměník s teplosměnnými hady seřazenými nad sebou (varianta č.1)

Posting ANSYS Product Improvement Program startup data  
Done.

> Multicore processors detected. Processor affinity set!  
Reading "C:\Users\Adrian\Desktop\5\_files\dp0\FFF\MECH\FFF.msh"...  
Buffering for file scan...

10197 nodes, binary.  
746 nodes, binary.  
20873 2D interior faces, zone 1, binary.  
72 2D wall faces, zone 5, binary.  
34 2D wall faces, zone 6, binary.  
640 2D wall faces, zone 7, binary.  
10645 mixed cells, zone 2, binary.

Building...  
mesh  
materials,  
interface,  
domains,  
zones,  
tubewall  
topboilerwall  
boilerwall  
surface\_body  
interior-surface\_body  
parallel,  
Done.

Preparing mesh for display...  
Done.

Writing Settings file "C:\Users\Adrian\Desktop\5\_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.set"...  
writing rp variables ... Done.  
writing domain variables ... Done.  
writing surface\_body (type fluid) (mixture) ... Done.  
writing interior-surface\_body (type interior) (mixture) ... Done.  
writing boilerwall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing topboilerwall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing tubewall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing zones map name-id ... Done.

#### Memory Usage

cells faces nodes objps edges  
-----  
Number Used: 10645 21619 10943 7 0  
Mbytes Used: 1 4 1 0 0  
Number Allocated: 10645 21619 10943 1024 0  
Mbytes Allocated: 2 4 1 0 0

Array Memory Used: 0 Mbytes  
Array Memory Allocated: 0 Mbytes

#### Mesh Size

Level Cells Faces Nodes Partitions  
0 10645 21619 10943 1

1 cell zone, 4 face zones.

#### Mesh Size

Level Cells Faces Nodes Partitions  
0 10645 21619 10943 1

1 cell zone, 4 face zones.

Material acetaldehyde:  
New property "Density" has been added.  
Selecting constant method for "Density" -- data required.  
New property "Thermal Conductivity" has been added.  
Selecting constant method for "Thermal Conductivity" -- data required.  
New property "Viscosity" has been added.  
Selecting constant method for "Viscosity" -- data required.

Material acetyl-chloride:  
New property "Density" has been added.  
Selecting constant method for "Density" -- data required.  
New property "Thermal Conductivity" has been added.

Selecting constant method for "Thermal Conductivity" -- data required.  
New property "Viscosity" has been added.  
Selecting constant method for "Viscosity" -- data required.

Copy of Material from database to current case has been cancelled!

Material acetaldehyde-new:  
New property "Density" has been added.  
Selecting constant method for "Density" -- data required.  
New property "Thermal Conductivity" has been added.  
Selecting constant method for "Thermal Conductivity" -- data required.  
New property "Viscosity" has been added.  
Selecting constant method for "Viscosity" -- data required.

Copy of Material from database to current case has been cancelled!

Copy of Material from database to current case has been cancelled!

Copy of Material from database to current case has been cancelled!

Copy of Material from database to current case has been cancelled!

Copy of Material from database to current case has been cancelled!

Writing Settings file "C:\Users\Adrian\Desktop\5\_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.set"...  
writing rp variables ... Done.  
writing domain variables ... Done.  
writing surface\_body (type fluid) (mixture) ... Done.  
writing interior-surface\_body (type radiator) (mixture) ... Done.  
writing boilerwall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing topboilerwall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing tubewall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing zones map name-id ... Done.

Writing "| gzip -2cf > FFF-Setup-Output.cas.gz" ...  
Writing temporary file C:\Users\Adrian\AppData\Local\Temp\flntgz-138322 ...  
10645 mixed cells, zone 2, binary.  
20873 2D jump faces, zone 1, binary.  
72 2D wall faces, zone 5, binary.  
34 2D wall faces, zone 6, binary.  
640 2D wall faces, zone 7, binary.  
10943 nodes, binary.  
10943 node flags, binary.  
Done.

	iter	continuity	x-velocity	y-velocity	energy	time/iter
1	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1.0508e-02	0:00:00	999
2	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	2.7958e-03	0:16:38	998
3	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	7.1731e-04	0:13:18	997
4	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1.8451e-04	0:10:37	996



```
5 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 4.9213e-05 0:08:29 995
6 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 1.4516e-05 0:10:06 994
7 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 5.1173e-06 0:08:04 993
8 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 2.1611e-06 0:06:27 992
! 9 solution is converged
9 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 9.9786e-07 0:05:09 991
Writing data to C:\Users\Adrian\Desktop\5_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.ip ...
x-coord
y-coord
pressure
x-velocity
y-velocity
temperature
Done.
```

```
Calculation complete.
Creating zone surface for surface_body zone
Writing "| gzip -2cf > FFF-1.cas.gz"...
Writing temporary file C:\Users\Adrian\AppData\Local\Temp\flntgz-138323 ...
10645 mixed cells, zone 2, binary.
20873 2D jump faces, zone 1, binary.
72 2D wall faces, zone 5, binary.
34 2D wall faces, zone 6, binary.
640 2D wall faces, zone 7, binary.
10943 nodes, binary.
10943 node flags, binary.
Done.
```

### 5.5.2 Rekuperační trubkový výměník s přesazenými teplosměnnými hady s stejným tvarem (varianta č.2)

Posting ANSYS Product Improvement Program startup data  
Done.

> Multicore processors detected. Processor affinity set!  
Reading "C:\Users\Adrian\Desktop\7\_files\dp0\FFF\MECH\FFF.msh"...  
Buffering for file scan...

12901 nodes, binary.  
772 nodes, binary.  
26310 2D interior faces, zone 1, binary.  
97 2D wall faces, zone 5, binary.  
35 2D wall faces, zone 6, binary.  
640 2D wall faces, zone 7, binary.  
13378 mixed cells, zone 2, binary.

Building...  
mesh  
materials,  
interface,  
domains,  
zones,  
tubewall  
boilertopwall  
boilerwall  
surface\_body  
interior-surface\_body  
parallel,  
Done.

Preparing mesh for display...  
Done.

Writing Settings file "C:\Users\Adrian\Desktop\7\_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.set"...  
writing rp variables ... Done.  
writing domain variables ... Done.  
writing surface\_body (type fluid) (mixture) ... Done.  
writing interior-surface\_body (type interior) (mixture) ... Done.  
writing boilerwall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing boilertopwall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing tubewall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing zones map name-id ... Done.

Mesh Size

Level Cells Faces Nodes Partitions  
0 13378 27082 13673 1

1 cell zone, 4 face zones.

Mesh Size

Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	13378	27082	13673	1

1 cell zone, 4 face zones.

Copy of Material from database to current case has been cancelled!

Checking the case set-up ...

Done

Writing Settings file "C:\Users\Adrian\Desktop\7\_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.set"...  
writing rp variables ... Done.  
writing domain variables ... Done.  
writing surface\_body (type fluid) (mixture) ... Done.  
writing interior-surface\_body (type radiator) (mixture) ... Done.  
writing boilerwall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing boilertopwall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing tubewall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing zones map name-id ... Done.

Writing "| gzip -2cf > FFF-Setup-Output.cas.gz"...  
Writing temporary file C:\Users\Adrian\AppData\Local\Temp\flntgz-39922 ...  
13378 mixed cells, zone 2, binary.  
26310 2D jump faces, zone 1, binary.  
97 2D wall faces, zone 5, binary.  
35 2D wall faces, zone 6, binary.  
640 2D wall faces, zone 7, binary.  
13673 nodes, binary.  
13673 node flags, binary.  
Done.

### 5.5.3 Rekuperační trubkový výměník s přesazenými teplosměnnými hady s různým tvarem (varianta č.3)

Posting ANSYS Product Improvement Program startup data  
Done.

>

ADR-PC is already loaded (30.6075%). Process affinity not being set.  
Reading "C:\Users\Adrian\Desktop\9\_files\dp0\FFF\MECH\FFF.msh"...  
Buffering for file scan...

9645 nodes, binary.  
801 nodes, binary.  
19806 2D interior faces, zone 1, binary.  
133 2D wall faces, zone 5, binary.  
28 2D wall faces, zone 6, binary.  
640 2D wall faces, zone 7, binary.  
10130 mixed cells, zone 2, binary.

Building...  
mesh  
materials,  
interface,  
domains,  
zones,  
tubewall  
boilertopwall  
boilerwall  
surface\_body  
interior-surface\_body  
parallel,  
Done.

Preparing mesh for display...  
Done.

Writing Settings file "C:\Users\Adrian\Desktop\9\_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.set"...  
writing rp variables ... Done.  
writing domain variables ... Done.  
writing surface\_body (type fluid) (mixture) ... Done.  
writing interior-surface\_body (type interior) (mixture) ... Done.  
writing boilerwall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing boilertopwall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing tubewall (type wall) (mixture) ... Done.  
writing zones map name-id ... Done.

Mesh Size

Level Cells Faces Nodes Partitions  
0 10130 20607 10446 1

1 cell zone, 4 face zones.

Material acetyl-chloride:

New property "Density" has been added.

Selecting constant method for "Density" -- data required.

New property "Thermal Conductivity" has been added.

Selecting constant method for "Thermal Conductivity" -- data required.

New property "Viscosity" has been added.

Selecting constant method for "Viscosity" -- data required.

Writing Settings file "C:\Users\Adrian\Desktop\9\_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.set"...

writing rp variables ... Done.

writing domain variables ... Done.

writing surface\_body (type fluid) (mixture) ... Done.

writing interior-surface\_body (type radiator) (mixture) ... Done.

writing boilerwall (type wall) (mixture) ... Done.

writing boilertopwall (type wall) (mixture) ... Done.

writing tubewall (type wall) (mixture) ... Done.

writing zones map name-id ... Done.

Writing "| gzip -2cf > FFF-Setup-Output.cas.gz"...

Writing temporary file C:\Users\Adrian\AppData\Local\Temp\flntgz-90202 ...

10130 mixed cells, zone 2, binary.

19806 2D jump faces, zone 1, binary.

133 2D wall faces, zone 5, binary.

28 2D wall faces, zone 6, binary.

640 2D wall faces, zone 7, binary.

10446 nodes, binary.

10446 node flags, binary.

Done.

iter continuity x-velocity y-velocity energy time/iter

1 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 1.0789e-02 0:16:39 999

2 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 2.8757e-03 0:16:38 998

3 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 7.3901e-04 0:13:18 997

4 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 1.8978e-04 0:10:37 996

5 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 4.9962e-05 0:08:29 995

6 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 1.4134e-05 0:06:47 994

7 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 4.6749e-06 0:05:25 993

8 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 1.8730e-06 0:04:20 992

! 9 solution is converged

9 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 8.3657e-07 0:03:28 991

Writing data to C:\Users\Adrian\Desktop\9\_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.ip ...

x-coord

y-coord

pressure

x-velocity

y-velocity

temperature

Done.

Calculation complete.

Creating zone surface for surface\_body zone

## 6. Závěr

Cílem této práce bylo, navrhnout konstrukční řešení výměníku tepla směšovací, kondenzační nádrže, jenž je zařízení kompenzace objemu primárního okruhu tlakovodní jaderné elektrárny. V první části práce byl proveden obecný popis zařízení a jeho hlavních konstrukčních částí. Následně byla řešena problematika rekuperačních výměníku tepla a jejich konstrukce a zefektivnění funkce.

V druhé části práce byl proveden tepelný výpočet, konstrukční výpočet hlavních rozměru kondenzační nádoby, konstrukční výpočet vnitřního výměníku tepla. Poté byl proveden návrh parního kolektoru a návrh pojistných zařízení. V závěrečné výpočetní části se provedl návrh použitých materiálu a pevnostní výpočet pláště tlakové nádoby.

V třetí části práce byla provedena volba a posouzení o co nejvhodnější použití tvarové varianty a konstrukce vnitřního výměníku tepla. Nejprve byly zvoleny tři nejvhodnější varianty výměníku tepla. Ty byly následně rozkresleny do schémat a poté byl zahájen proces modelování a výpočtu jednotlivých variant výměníku tepla. Nejdříve proběhl proces tvorby tvaru výpočetního modelu, následně tvorba výpočetní sítě, zadání parametru potřebných pro výpočet a následný samotný výpočet. Výsledky výpočtu byly posouzeny a následně proběhl výběr nejvhodnější tvarové varianty výměníku tepla. Z výsledku výpočtu bylo zřejmé, že nejvhodnější varianta je varianta č. 2., kde se dosáhlo nejlepšího, tvaru teplotního pole a největšího rozdílu teplot na teplosměnných plochách.

V poslední části práce byl proveden konstrukční návrh 3D modelu kondenzační nádoby v programu Autodesk Inventor Professional 2019. Z vytvořeného 3D modelu byla vytvořena výkresová dokumentace nádoby. Výkresová dokumentace se skládá ze sestavného výkresu směšovací, kondenzační nádoby.

Všechny požadavky zadané v zadání diplomové práce byly splněny.

## 7. POUŽITÁ LITERATURA

1. AKROS, *Trubky kruhové bezešvé* [online] 2014 [cit. 7. 1. 2019]. Dostupné z: <https://www.akros.cz/trubky-kruhove-bezesve-mat-1-4541>
2. BALÁŠ, M., *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-4770-7.
3. BEČVÁŘ, Josef. *Jaderné elektrárny*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1978.
4. BLAHOŽ, Vladimír a Zdeněk KADLEC. *Základy sdílení tepla*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1996. ISBN 80-902001-1-7.
5. BODANSKY, David. *Nuclear energy: principles, practices, and prospects*. 2nd ed. New York: Springer, c2004. ISBN 0-387-20778-3.
6. ČVUT, *Výměníky tepla, katedra technických zařízení budov* [online] 2011 [cit. 15. 12. 2018]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125yatm/prednasky/125yatm-06.pdf>
7. KOLAT, P., Tomášek, D., *Jaderná energetika*, studijní opora pro SŠ. Katedra energetiky VŠB-TU Ostrava, 2012.
8. KOLAT, P., *Úvod do jaderné energetiky*, studijní opora. Katedra energetiky VŠB-TU Ostrava, 2012.
9. KUPPAN, T. *Heat exchanger design handbook*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2013. Mechanical engineering (Taylor & Francis). ISBN 978-1-4398-4212-6.
10. LEINVEBER, J. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4. dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7. Tabulky.
11. MIKULČÁK, Jiří. *Matematicky, fyzikální a chemické tabulky*. První vydání, Praha: PROMETHEUS 2010. ISBN 978-80-7196-264-9
12. UBRÁ, Olga. *Termo a hydrodynamika barbotéru JE VVER*. Praha, 1983. Vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní, katedra tepelných a jaderných energetických zařízení.
13. ZOBLIVÝ, Michal. *Vstupní data pro bezpečnostní analýzy: 8. Systém lokalizace havárie*. ČEZ a.s. 2012

## **8. SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha A: Výkres sestavení směšovací, kondenzační nádoby

Příloha B: CD s obsahem diplomové práce